



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Emulação de um motor de combustão interna através de um acionamento eletromecânico de velocidade variável utilizando um motor de indução trifásico

LUÍS CARLOS MORUJO AGOSTINHO

Licenciado

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica, ramo de Energia

Orientadores:

Doutor Sérgio Miguel Redondo Faias

Mestre Ricardo Jorge Ferreira Luís

Júri:

Presidente: Doutor José Manuel Igreja (ISEL)

Vogais:

Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa (ISEL)

Doutor Sérgio Miguel Redondo Faias (ISEL)

Dezembro de 2014

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho, o processo de emulação de um motor de combustão interna Diesel, utilizando conversores de potência e motores assíncronos trifásicos. Com base nesta premissa é descrita, a composição de um grupo gerador Diesel, as técnicas de modelação, o método de controlo de tensão e frequência utilizado no processo de emulação do motor de combustão interna Diesel.

Para o processo de modelação escolhido, é descrita a obtenção das características do gerador síncrono constituinte do grupo gerador Diesel. Com isto, apresentam-se os ensaios realizados em regime permanente para a obtenção do mapa de eficiência do motor Diesel. São também descritos os ensaios dinâmicos com aplicação de cargas elétricas, para obtenção da característica de velocidade do motor Diesel em regime transitório.

Com os resultados extraídos dos ensaios ao grupo gerador Diesel, é realizada a implementação do modelo matemático obtido. É também apresentado o processo de comunicação e controlo dos motores assíncronos trifásicos para emulação do comportamento do motor de combustão interna Diesel.

Por fim, são apresentados os resultados da implementação realizada, com a validação do sistema perante os ensaios realizados.

PALAVRAS-CHAVE

Grupos Geradores Diesel; Motores de Combustão Interna; Conversores de Potência; Mapa de Eficiência; Regime Dinâmico; Modelação Matemática; Motores Assíncronos; Emulação;

ABSTRACT

In this work is presented the emulation process of a Diesel internal combustion engine, using electric power converters and three-phase asynchronous motors. In this base is described the composition of an Diesel generator set, the modulation technique and the control of voltage and frequency method utilized in the process of the emulation.

For the modulation process chosen, are described the electric characteristics achievement of the synchronous generator, which is a component part of the Diesel generator set. Are presented the essays realized in a continuous regime to obtain the performance map of the Diesel engine. Are described too, the essays realized in a dynamic regime induced by application of electric loads, for the achievement of speed characteristic in this regime.

With the results extracted of the essays to Diesel generator set, is realized the implementation of the mathematic model. The communication and control process of the three-phase asynchronous motors to emulate the speed behavior of the Diesel engine is presented too.

Finally the results of the implemented model, with the validation of the emulation system face to essays performed on Diesel engine are presented.

KEYWORDS

Diesel Generator Set; Internal Combustion Engines; Power Converters; Performance Map; Mathematic Modulation; Asynchronous Motors; Emulation;

AGRADECIMENTOS

A realização de uma dissertação de mestrado engloba não só o autor mas também todos aqueles que contribuíram para que esta fosse realizada. Desta forma, quero assinalar os seguintes agradecimentos:

Agradeço aos professores que me atribuíram a realização desta dissertação e que orientaram e ajudaram a concretizá-la, o Mestre Ricardo Luís e o Doutor Sérgio Faias. Também pela forma como me demonstraram a importância de um trabalho científico desta dimensão e contribuíram para que crescesse em todos os níveis durante este período.

Aos membros da CIPROMEC, que partilharam conhecimentos e colaboraram em todas as medidas possíveis para a realização deste trabalho. Um especial agradecimento ao Sr. Carlos Lucas, por todo o apoio prestado na fase da realização de ensaios ao grupo gerador e na construção da bancada de ensaios, que com o seu conhecimento e boa disposição contribuiu para a concretização deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas, em especial ao Engenheiro Daniel Barreto, com quem partilhei grande parte dos esforços e sacrifícios durante praticamente todas as fases deste trabalho, por toda a ajuda prestada na realização do mesmo e, por todo o companheirismo existente entre nós. Um especial agradecimento e faço votos de sucesso no trabalho ainda a realizar e felicidades para a vida.

Ao meu irmão, Hugo agradeço todo o apoio e força dados para que nunca parasse e que ajudou a fazer de mim o que sou hoje. Aos meus pais e avô por toda a ajuda e apoio prestados em toda a minha vida e que sem eles nunca teria chegado até aqui.

À minha namorada Cristina, aqui registo um grato agradecimento, pelo ânimo prestado, apoio, compreensão e por fazer parte da minha vida.

LISTA DE SÍMBOLOS

α_s – Ângulo do vetor da corrente do estator em relação ao eixo direto d, rad

δ – Constante de amortecimento

ρ_s – Ângulo do vetor de fluxo estatórico em relação ao eixo direto d, rad

$\bar{\varphi}_s$ – Vetor de fluxo estatórico;

$\bar{\varphi}_{sref}$ – Vetor do fluxo estatórico de referência;

φ – Desfasamento angular entre tensão e corrente, rad

ω_a – Frequência natural amortecida, Hz

ω_0 – Frequência natural não amortecida, Hz

dq – Eixo direto e em quadratura

dT_e – Erro do binário eletromagnético, Nm

\bar{E}_0 – Força eletromotriz, V

E_{min} – Força eletromotriz mínima do ensaio de escorregamento, V

f – Frequência, Hz

\bar{i}_s – Vetor da corrente do estator, A

I_f – Corrente de excitação, A

I_a – Corrente nos enrolamentos do estator, A

I_1 – Corrente de fase 1, A

I_2 – Corrente de fase 2, A

I_3 – Corrente de fase 3, A

I_{max} – Corrente máxima do ensaio de escorregamento, A

I_{min} – Corrente máxima do ensaio de escorregamento, A

L_d – Indutância segundo eixo direto, H

L_a – Indutância estatórica, H

M_p – Sobrelevação relativa, %

N – Pólo norte magnético

P – Pressão, bar

P_u – Potência ativa útil, W

P_d – Potência ativa desenvolvida, W

R_a – Resistência estatórica, Ω

S – Pólo sul magnético

S_0 – Sobre-elevação

$S1$ – Estado de comutação do ondulator

$S2$ – Estado de comutação do ondulator

$S3$ – Estado de comutação do ondulator

t – Tempo, s

t_p – Tempo de pico, s

t_s – Tempo de estabelecimento, s

t_r – Tempo de subida, s

T_e – Binário eletromagnético, Nm;

$T_{e\ ref}$ – Binário eletromagnético de referência, Nm

T_m – Binário no veio do motor, Nm

T_a – Período oscilatório, s

U – Tensão elétrica, V

U_a – Tensão aos terminais do estator, V

U_{DC} – Tensão de alimentação do ondulator, V

V_c – Volume restante no cilindro, cm^3

V_t – Volume total, cm^3

V_d – Volume de ar comprimido, cm^3

V_f – Valor final de estabelecimento

V_s – Tensão Simples, V

X_d – Reactância síncrona segundo eixo direto, Ω

X_{qs} – Reactância síncrona de saturação segundo eixo em quadratura, Ω

X_{qu} – Reactância síncrona não saturada segundo eixo em quadratura, Ω

$y(t_p)$ – Valor máximo de $y(t)$, rpm

$y(\infty)$ – Valor de escalão, rpm

ABREVIATURAS

rpm – Rotações por minuto

AVR – Automatic Voltage Regulator

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CSI- Current Source Inverter

DTC – Direct Torque Control

GE – Gerador Elétrico

GGD – Grupo Gerador Diesel

GTO – Gate Turn-off Thyristor

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

MCI – Motor de Combustão Interna

MD – Motor Diesel

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

PI – Controlador Proporcional Integrador

RTU – Remote Terminal Unit

VSI – Voltage Source Inverter

V/f – Método de controlo escalar de tensão/frequência

LISTA DE PROGRAMAS

LabView 6.1

Matlab/simulink R2009b

CONVENÇÕES

Neste trabalho é convencionado que a velocidade do grupo gerador Diesel, máquina motriz Diesel e máquinas elétricas da bancada de ensaios é expressa em rotações por minuto (rpm). Tal é justificado, por facilidade de entendimento, dado que é a unidade predominante, utilizada pelos construtores de motores de combustão interna.

As referências bibliográficas utilizadas são efetuadas de acordo com a norma portuguesa, NP 405 onde as citações são realizadas entre parênteses retos com o número respetivo atribuído na bibliografia.

As referências realizadas ao longo do texto são listadas segundo a primeira invocação no texto. É considerada a utilização de abreviaturas de acordo com NP 139 e são utilizadas palavras e termos utilizados nas referências bibliográficas de acordo com a NP 3680.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1 – Introdução | 2 |
| 1.1 – Motivação do trabalho | 2 |
| 1.2 – Enquadramento do trabalho | 2 |
| 1.3 – Objetivos da dissertação..... | 3 |
| 1.4 – Estrutura da dissertação | 4 |
| 2 – Grupo de Geração Diesel | 6 |
| 2.1 – Motor de combustão interna | 6 |
| 2.2 – Gerador elétrico..... | 9 |
| 2.3 – Controladores de tensão e frequência | 14 |
| 2.3.1 – Regulador automático de tensão | 14 |
| 2.3.2 – Controlador de frequência..... | 16 |
| 2.4 – Técnicas de modelação do grupo Diesel..... | 18 |
| 2.5 – Emulação de motor de combustão interna | 27 |
| 2.6 – Conclusões | 32 |
| 3 – Modelação Matemática de Base Experimental do Grupo Diesel | 36 |
| 3.1 – Descrição do grupo Diesel | 36 |
| 3.1.1 – Motor Diesel | 37 |
| 3.1.2 – Gerador elétrico..... | 38 |
| 3.1.3 - Controladores de tensão e frequência do grupo Diesel | 43 |
| 3.1.4 - Regulação de velocidade do grupo Diesel..... | 46 |
| 3.2 – Mapa de eficiência do motor Diesel | 50 |
| 3.2.1 - Determinação da curva de binário máximo | 51 |
| 3.2.2 – Ensaio do grupo gerador Diesel com velocidade e cargas variáveis | 55 |
| 3.2.3 – Determinação do mapa de eficiência do motor Diesel | 60 |
| 3.3 – Operação do motor de combustão Diesel em regime transitório | 65 |
| 3.3.1 – Ensaio dinâmicos do motor de combustão interna Diesel..... | 65 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.2 – Obtenção do modelo dinâmico do motor de combustão interna Diesel..... | 72 |
| 3.4 – Modelo matemático do motor de combustão interna Diesel | 75 |
| 3.5 – Conclusões | 77 |
| 4 – Emulação do motor Diesel | 80 |
| 4.1 – Acionamentos com motores assíncronos trifásicos..... | 81 |
| 4.1.1 – Controlo directo de binário | 82 |
| 4.1.2 – Parametrização dos conversores de potência | 86 |
| 4.1.3 – Motor assíncrono trifásico..... | 88 |
| 4.2 – Sistema de emulação do motor Diesel | 89 |
| 4.2.1 – Bancada de ensaios..... | 89 |
| 4.2.2 - Implementação dos controlos de velocidade e de binário dos motores assíncronos . | 91 |
| 4.3 – Implementação do protocolo de comunicação série nos conversores de potência..... | 92 |
| 4.4 – Programa de comando e monitorização do sistema de emulação | 94 |
| 4.5 – Validação experimental do sistema de emulação..... | 99 |
| 4.5.1 – Ensaio de arranque e paragem em vazio e em carga | 101 |
| 4.5.2 – Ensaio de colocação e deslastre de cargas a velocidade constante..... | 110 |
| 4.6 – Conclusões | 115 |
| 5 – Conclusões e Perspetivas de Desenvolvimento Futuro..... | 118 |
| 5.1 – Conclusões | 118 |
| 5.2 – Perspetivas de desenvolvimento futuro..... | 119 |
| Referências bibliográficas | 122 |
| Anexo I – Elementos Complementares à Realização do Trabalho | 126 |
| I.1 – Código do programa em Matlab para obtenção dos gráficos do mapa de eficiência do MD | 126 |
| I.2 – Resultados dos ensaios ao grupo gerador Diesel em regime permanente | 130 |
| I.3 – Registo de velocidade dos ensaios de regime dinâmico do motor Diesel | 134 |
| I.4 – Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade do motor Diesel | 143 |
| I.5 – Parametrização dos conversores de potência..... | 154 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Etapas de funcionamento do MD | 7 |
| Figura 2.2 – Ciclo Diesel ideal..... | 9 |
| Figura 2.3 – Rotor de pólos salientes com 3 pares de pólos | 12 |
| Figura 2.4 – Rotor de pólos lisos com 1 par de pólos | 13 |
| Figura 2.5 – Máquina Síncrona com excitação sem auxílio a escovas | 14 |
| Figura 2.6 – Gerador síncrono com sistema de excitação sem escovas com AVR | 15 |
| Figura 2.7 – Composição genérica de um sistema AVR | 16 |
| Figura 2.8 – Regulador de velocidade com controlador PID..... | 17 |
| Figura 2.9 – Exemplo de Aplicação de Modelo Termodinâmico em comparação com Modelo de Vibe no cálculo da temperatura resultante da injeção de ar e gasolina num cilindro | 20 |
| Figura 2.10 – Exemplo de aplicação de modelos multidimensionais CFD de realizado no STAR-CD..... | 21 |
| Figura 2.11 – Exemplo de aplicação de modelos COM. | 23 |
| Figura 2.12 – Modelo de caixa preta considerado para efeitos de emulação do MD | 24 |
| Figura 2.13 – Esquema equivalente da máquina síncrona | 25 |
| Figura 2.14 – Esquema equivalente da máquina síncrona segundo o eixo dq num referencial solidário com o rotor | 26 |
| Figura 2.15 – Mapa de eficiência de consumo específico de combustível em função do binário e velocidade desenvolvidos por um MD..... | 27 |
| Figura 2.16 – Diagrama de blocos de função de minimização de combustível,..... | 29 |
| Figura 2.17 – Diagrama de blocos do modelo do turbocompressor | 29 |
| Figura 2.18 – Esquema de bancada de ensaios de emulação | 30 |
| Figura 2.19 – Esquema dos principais componentes alvos de emulação..... | 31 |
| Figura 2.20 – Curva de binário máximo | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.21 – Emulação de um veículo por dois motores elétricos | 32 |
| Figura 3.1 – GGD AtlasCopco QAS20 | 36 |
| Figura 3.2 – MD Kubota M-Series..... | 37 |
| Figura 3.3 – Gerador Síncrono <i>Leroy Somer LSA 40.M5</i> | 38 |
| Figura 3.4 – Enrolamentos estatóricos ligados em estrela com terminais acessíveis do <i>Leroy Somer</i> , modelo <i>LSA 40.M5</i> presente no GGD..... | 39 |
| Figura 3.5 – Resultado do ensaio de escorregamento | 40 |
| Figura 3.6 – Ensaio em vazio | 41 |
| Figura 3.7 - Ensaio em curto-circuito..... | 42 |
| Figura 3.8 – Acelerador manual do MD | 44 |
| Figura 3.9 – Alavanca de paragem manual | 45 |
| Figura 3.10 – a) AVR <i>Leroy Somer R220</i> usado no gerador síncrono do GGD..... | 46 |
| Figura 3.11 - Componentes associados à régua de admissão..... | 47 |
| Figura 3.12 – Conjunto composto pelo regulador de ralenti, régua e solenoide no MD em estudo | 47 |
| Figura 3.13 – Peça de regulação de ralenti..... | 48 |
| Figura 3.14 – Batente interno do acelerador | 50 |
| Figura 3.15 – Curva de binário máximo do GGD..... | 54 |
| Figura 3.16 – Balança e recipiente de combustível..... | 57 |
| Figura 3.17 - Diagrama vetorial da máquina síncrona segundo o eixo dq | 61 |
| Figura 3.18 – Mapa de eficiência em superfície de consumo em função da velocidade e potência | 62 |
| Figura 3.19 – Mapa de eficiência em superfície de consumo específico em função da velocidade e binário..... | 63 |
| Figura 3.20 - Mapa de eficiência de Velocidade vs. Binário com curvas de potência | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.23 – Taquigeradora utilizada para medição de velocidade no MD | 67 |
| Figura 3.24 – Ensaio de colocação de cargas a 1200rpm | 68 |
| Figura 3.25 – Ensaio de deslastre de cargas a 1200rpm | 69 |
| Figura 3.26 – Ensaio de colocação e deslastre do escalão de 90% de carga à velocidade de 1200rpm | 69 |
| Figura 3.27 – Ensaio de arranque e paragem à plena carga a 1200rpm..... | 70 |
| Figura 3.28 – Ensaio de arranque e paragem em vazio a 1200 rpm | 71 |
| Figura 3.29 – Resposta no tempo de um sistema de segunda ordem..... | 72 |
| Figura 3.30 – Ensaio de arranque e paragem em vazio a 1500rpm | 74 |
| Figura 3.31 – Sobrelevação relativa em função da constante de amortecimento | 75 |
| Figura 4.1 – Processo de emulação do MD | 80 |
| Figura 4.2 - Esquema de comunicação existente entre módulos | 81 |
| Figura 4.3 – Representação dos estados de comutação do ondulator de tensão trifásico em ponte e a relação com os vetores do estator | 83 |
| Figura 4.4 – Vetores estatóricos do fluxo e corrente no referencial dq | 84 |
| Figura 4.5 – Diagrama de blocos característico do funcionamento do DTC | 85 |
| Figura 4.6 - Esquema de controlo em cadeia fechada utilizado no conversor de potência | 88 |
| Figura 4.7 – Motores assíncronos trifásicos da bancada de ensaios | 90 |
| Figura 4.8 – (a) Conversores de potência ACS 600, (b) Consola de comando CDP 312..... | 90 |
| Figura 4.9 – (a) Módulo de conversão NMBA-01, (b) Módulo de conversão NPCU-01 | 91 |
| Figura 4.10 - Estrutura de mensagem Modbus RTU | 93 |
| Figura 4.11 – Exemplo do ciclo da função <i>for</i> utilizada para o processamento do programa de emulação | 96 |
| Figura 4.12 – Diagrama funcional do programa de emulação construído em LabView 6.1 | 97 |
| Figura 4.13 – Interface do Programa de Emulação do MD, construído em LabView 6.1..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.14 – Bancada de ensaios constituinte do sistema de emulação | 99 |
| Figura 4.15 – Resposta de velocidade do sistema de emulação a ensaio de arranque e paragem em vazio a 1500rpm | 102 |
| Figura 4.16 - Resposta de velocidade do sistema de emulação a ensaio de arranque e paragem à plena carga com regulação em vazio a 1500rpm | 107 |
| Figura 4.17 – Resposta de velocidade do sistema de emulação a ensaio de colocação de escalões de carga a 1770rpm | 111 |
| Figura 4.18 – Resposta de velocidade do sistema de emulação a ensaio de colocação e deslastre de escalão máximo de carga a 1800rpm e com escalão mínimo de carga | 113 |
| Figura I.1 – Resposta de velocidade à adição de escalões de carga a 1200rpm..... | 135 |
| Figura I.2 – Resposta de velocidade ao deslastre de escalões de carga a 1200rpm | 135 |
| Figura I.3 – Resposta de velocidade à adição e deslastre de escalões de carga a 1200rpm..... | 136 |
| Figura I.4 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem à plena carga com regulação em vazio a 1200rpm..... | 136 |
| Figura I.5 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem em vazio a 1200rpm | 137 |
| Figura I.6 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem à plena carga com regulação em vazio a 1500rpm..... | 137 |
| Figura I.7 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem em vazio a 1200rpm | 138 |
| Figura I.8 – Resposta de velocidade à adição de escalões de carga a 1800rpm..... | 138 |
| Figura I.9 – Resposta de velocidade ao deslastre de escalões de carga a 1800rpm | 139 |
| Figura I.10 – Resposta de velocidade à adição e deslastre de escalões de carga a 1800rpm..... | 139 |
| Figura I.11 – Resposta de velocidade à adição de escalões de carga a 2400rpm..... | 140 |
| Figura I.12 – Resposta de velocidade ao deslastre de escalões de carga a 2400rpm..... | 141 |
| Figura I.13 – Resposta de velocidade à adição e deslastre de escalões de carga a 1800rpm..... | 141 |

| | |
|--|-----|
| Figura I.14 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem à plena carga com regulação em vazio a 2400rpm..... | 142 |
| Figura I.15 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem em vazio a 2400rpm | 142 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Classificação de máquinas elétricas rotativas | 10 |
| Tabela 3.1 – Velocidades de ensaio | 51 |
| Tabela 3.2 – Corrente admissível do gerador síncrono em função da temperatura | 53 |
| Tabela 3.3 – Resultado do ensaio realizado para a velocidade de 1500rpm..... | 59 |
| Tabela 3.4 – Velocidades utilizadas na realização dos ensaios dinâmicos | 66 |
| Tabela 3.5 - Escalões de carga utilizados em percentagem do valor máximo..... | 66 |
| Tabela 3.6 - Características elétricas e mecânica da taquigeradora..... | 67 |
| Tabela 3.7 – Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade na situação de arranque e paragem em vazio a 1500rpm | 77 |
| Tabela 4.1 – Tabela de seleção de conversores de potência | 86 |
| Tabela 4.2 – Características técnicas dos conversores de potência, ACS 600..... | 87 |
| Tabela 4.3 - Características dos motores assíncronos trifásicos | 89 |
| Tabela 4.4 - Parâmetros escolhidos para estabelecimento de comunicação série | 92 |
| Tabela 4.5 - Endereçamento dos conversores de potência..... | 93 |
| Tabela 4.6 – Tabela de condições características para ensaio de arranque a plena carga | 95 |
| Tabela 4.7 – Parametrização da saída analógica do conversor de potência controlado em velocidade | 101 |
| Tabela 4.8 – Parâmetros obtidos na situação de paragem em vazio a 1500rpm..... | 105 |
| Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos do ensaio de arranque à plena carga a 1500rpm..... | 108 |
| Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos na situação de paragem à plena carga a 1500rpm | 109 |
| Tabela 4.11 - Parâmetros obtidos do ensaio de colocação de escalões de carga a 1770rpm..... | 112 |
| Tabela 4.12 – Parâmetros obtidos do ensaio de colocação do escalão máximo de carga a 1800rpm | 114 |
| Tabela I.1 – Dados obtidos a partir dos ensaios ao GGD em regime permanente..... | 130 |

| | |
|---|-----|
| Tabela I.2 - Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade do MD em ensaios de velocidade regulada entre 1450 e 1525rpm..... | 143 |
| Tabela I.3 – Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade do MD em ensaios de velocidade regulada entre 1500 e 1800rpm..... | 147 |
| Tabela I.4 – Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade do MD em ensaios de velocidade regulada entre 2000 e 2390rpm..... | 151 |
| Tabela I.5 – Parametrização dos conversores de potência segundo o seu manual de utilização, | 152 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Resumo

Neste capítulo é apresentado o âmbito de trabalho da dissertação, os objetivos da mesma, bem como a sua estrutura.

1 – INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, torna-se vital um fornecimento energético capaz de satisfazer as necessidades existentes. Formas de fornecimento díspares como, a produção a partir de fontes de energia renovável, ou de fontes não renováveis, como é o caso dos combustíveis fósseis, suportam hoje em dia uma economia mundial que sem métodos de produção de energia elétrica, seria insustentável.

Neste ponto, serão apresentados os fatores envolventes na motivação da dissertação que permitem o seu desenvolvimento, o enquadramento do trabalho, os objetivos da dissertação e a estrutura onde assenta a sua realização.

1.1 – Motivação do trabalho

Necessidades como, o aquecimento, a produção fabril, agrícola ou de transportes estão profundamente enraizadas em países industrializados e, são cada vez mais importantes, em países emergentes.

O fornecimento de energia elétrica pode ser realizado de inúmeras formas como, por exemplo, a partir de centrais hídricas, centrais térmicas, centrais fotovoltaicas, centrais nucleares, ou até mesmo de grupos geradores Diesel (GGD), até alimentar o consumidor final.

O presente trabalho centrar-se-á nos GGD, onde a produção é, por regra geral, feita em ambientes específicos. Estes ambientes são, por exemplo, quando a chegada de energia elétrica proveniente de outras fontes não existe, onde o fornecimento de energia elétrica é instável, quando se pretende assegurar uma alimentação sem interrupções num determinado consumidor, ou até mesmo para funcionamento em paralelo com a rede elétrica.

Perante isto, surge a necessidade de otimizar este tipo soluções, dado o seu uso crescente e a diversidade de ambientes em que são utilizadas.

1.2 – Enquadramento do trabalho

O trabalho desenvolvido enquadra-se numa parceria para investigação entre o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) e a AtlasCopco Portugal S.A., empresa de fabrico e

comercialização de GGD, que gentilmente cedeu um dos seus produtos para desenvolvimento e investigação por parte do ISEL.

Esta parceria insere-se num quadro de desenvolvimento de novos produtos e soluções para a instituição empresarial parceira, sendo uma forma de aproximação do tecido empresarial com os alunos.

Posto isto, no âmbito de trabalhos em que se insere esta parceria, é pela Seção de Engenharia e Sistemas (SES) da Área Departamental de Sistemas de Potência e Automação (ADESPA) que é feito o desenvolvimento e o contacto direto com a AtlasCopco. Pela SES, surge o tema desta dissertação numa forma de criar a possibilidade dos alunos de mestrado terem um contacto prático com um produto comercial, sob o qual se pretende otimizar.

Esta dissertação insere-se assim, numa base essencial para o projeto de aquisição de *know-how* dos equipamentos que compõe o GGD, permitindo desta forma alguma maturação na investigação de novas soluções e produtos.

1.3 – Objetivos da dissertação

A origem deste tema deve-se, para além da necessidade de desenvolver trabalho no grupo gerador Diesel de forma a se adquirir conhecimentos base para a investigação de novos produtos e soluções, mas também com a criação de um protótipo laboratorial que caracterize da forma mais fiel possível o grupo eletrogéneo com o qual se trabalha. Isto possibilitará, de forma cómoda e com menores custos em combustível de realizar ensaios de comportamento em vazio ou em diversos regimes de carga.

Pretende-se assim, a emulação do comportamento do motor de combustão interna Diesel (MD), parte integrante do GGD, de forma a que, se obtenha a partir de equipamentos de controlo e acionamento, o comportamento desejado por intermédio de um motor de indução trifásico.

Perante este objetivo final, é necessário atingir pontos intermédios de forma a permitir que seja possível a emulação desejada. É necessário assim, considerar os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os principais constituintes de um GGD e suas interações;
- Ensaiair e registar os diferentes regimes de funcionamento do GGD;
- Modelizar as respostas obtidas pelo GGD;

- Construir bancada de ensaios com equipamentos necessários à emulação;
- Estabelecer comunicação entre modelo criado e o acionamento eletromecânico;
- Comparar e validar resultados;

Pretende-se, por isso, retirar deste trabalho uma forte componente prática na medida em que serão realizados ensaios ao GGD, com a implementação computacional do modelo criado e será realizada a construção de uma bancada de ensaios para o sistema de emulação.

Este trabalho possuirá, também, uma componente matemática, com a modelização do comportamento obtido nos ensaios e uma componente mais teórica, com a caracterização das técnicas de modelização e do tipo de controlo utilizado.

1.4 – Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos que apresentam, de forma gradual o desenvolvimento do trabalho. O primeiro capítulo começa por fazer uma breve apresentação do tema, os objetivos que são propostos e o âmbito de trabalhos.

O segundo capítulo aborda os principais temas que suportam todo o trabalho desenvolvido, nomeadamente, sobre os constituintes do GGD, controladores de tensão e frequência, técnicas de modelação existentes e as mais indicadas a cada situação e, por fim, a apresentação de outros trabalhos de emulação de motores como o que constitui o GGD.

No terceiro capítulo é dado lugar à modelação matemática de base experimental, onde são descritos todos os constituintes do GGD e o seu funcionamento, bem como os ensaios realizados em todos os regimes abordados e os métodos utilizados e, por fim, a obtenção do modelo matemático.

O quarto capítulo refere-se à emulação do MD, onde são apresentados os componentes constituintes do sistema onde se executa a emulação. É, igualmente, caracterizado o protocolo de comunicação utilizado e, por fim, é feita a apresentação do programa de comando e monitorização do sistema e a apresentação e validação do sistema de emulação.

No quinto e último capítulo, são apresentadas conclusões do trabalho desenvolvido e perspectivas de desenvolvimento futuro.

CAPÍTULO 2

GRUPO DE GERAÇÃO DIESEL

Resumo

Neste capítulo são abordados cinco pontos específicos, em que cada um será desenvolvido por tópicos relevantes para esta tese. Os pontos específicos serão tratados pela seguinte ordem, motores de combustão interna, gerador elétrico, controladores de tensão e frequência, técnicas de modelação de grupo gerador Diesel e, por último, a emulação do motor de combustão interna.

2 – GRUPO DE GERAÇÃO DIESEL

2.1 – Motor de combustão interna

O motor de combustão interna (MCI) é uma máquina térmica que transforma a energia proveniente de uma reação química exotérmica em energia mecânica. O processo de conversão dá-se através de ciclos termodinâmicos que envolvem compressão, combustão e expansão de gases, [1].

São considerados MCI aqueles que utilizam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho. Ou seja, são estes gases que realizam os processos de compressão, aumento de temperatura (queima), expansão e, finalmente, exaustão. Assim, este tipo de motor distingue-se dos ciclos de combustão externa, nos quais os processos de combustão ocorrem externamente ao motor. Neste caso, os gases de combustão transferem calor a um segundo fluido que opera como fluido de trabalho, como ocorre por exemplo nos ciclos de Rankine, [2].

Os MCI também são, popularmente e genericamente, chamados de motores de explosão (ciclo Otto) ou combustão (ciclo Diesel). Esta denominação, apesar de frequente, não é tecnicamente correta. De facto, o que ocorre no interior das câmaras de combustão não é uma explosão de gases, mas sim, o aumento da pressão interna da câmara, decorrente da combustão (queima controlada com frente de chama). O que se pode chamar de explosão (queima descontrolada sem frente de chama definida) é uma detonação dos gases, que deve ser evitada ou controlada nos MCI, a fim de proporcionar maior durabilidade dos mesmos e menores taxas de emissões de poluentes atmosféricos provenientes da dissociação de gás nitrogénio, [3]. Os MCI podem-se caracterizar em função do tipo de movimento mecânico produzido pelo processo termodinâmico:

- Alternativos;
- Rotativos.

Os MCI podem funcionar de acordo com diferentes ciclos termodinâmicos, nomeadamente:

- Otto;
- Diesel;
- Wenkel;

No que respeita aos combustíveis utilizados nesta tipologia de motores podem enumerar-se alguns dos mais comuns, [4]:

- Gasolina;
- Gasóleo;
- Bio-Diesel;
- Etanol e Metanol;
- Gás Natural;
- Hidrogénio.

Como no caso específico deste trabalho se utiliza um MCI alternativo tipo Diesel cujo combustível é o gasóleo, importa contextualiza-lo historicamente.

Assim, relativamente ao que a história dita em relação aos MCI alternativos, especificamente os motores Diesel, estes foram patenteados em 1892 pelo Engenheiro Rudolf Diesel, dando o contributo mais que evidente pela massificação e versatilidade da sua utilização até aos dias de hoje. A evolução foi tremenda, contudo os princípios delineados pelo seu inventor são os mesmos, tendo o fator térmico o papel central para o desempenho dinâmico do motor. A sua utilização tem sido transversal praticamente em todos os equipamentos mecânicos industriais e transportes, [5].

Na Figura 2.1 é apresentado o esquema de funcionamento de um MD.

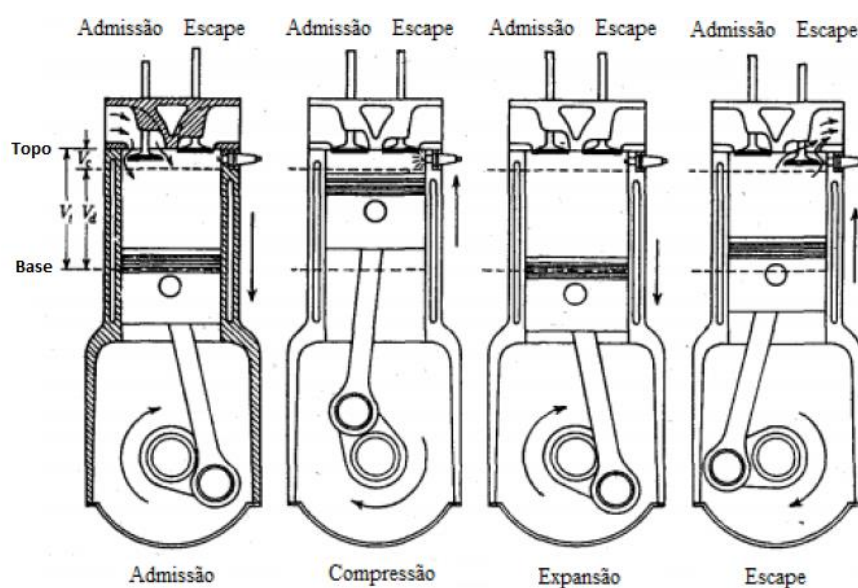


Figura 2.1 – Etapas de funcionamento do MD (Adaptado de [6])

Na Figura 2.1, verificam-se os diferentes passos do ciclo referente ao processo de queima de combustível num MD. Destes figuram o processo da admissão e compressão do ar, injeção do combustível, combustão e expansão dos gases da combustão e posterior escape desses gases. Como se observa, existem duas zonas onde o cilindro se limita no movimento, com o topo e a base a figurarem estes limites. O volume deixado pelo cilindro, V_c , estando este no topo, é caracterizado por apresentar a pressão mais elevada do volume total, V_t . Deste volume total, retira-se o volume deixado pelo cilindro e obtêm-se o volume de ar que é comprimido, V_d , [6].

Na admissão, à medida que o pistão se movimenta dentro do cilindro, devido ao efeito de sucção existente, o ar entra para o interior do cilindro através da válvula de admissão que se encontra aberta para o efeito. Efectua-se em seguida uma compressão adiabática (sem trocas de calor).

Na compressão, o pistão movimenta-se para cima dentro do cilindro, estando fechadas tanto as válvulas de admissão como de escape. Neste processo, o ar é comprimido até cerca de 1/16 do seu volume inicial até atingir uma pressão e temperatura que depende desta taxa de compressão.

No instante imediatamente anterior do pistão atingir a posição superior do cilindro, inicia-se a injeção do combustível pulverizado para o seu interior. Devido à alta temperatura que resulta da compressão do ar, este combustível entra em combustão, onde a pressão resultante da expansão dos gases da combustão força o pistão a movimentar-se para uma posição inferior, sendo este o único momento do ciclo em que se realiza trabalho e se transfere, através da cambota energia mecânica ao veio.

Perto do momento final do tempo de combustão, a válvula de escape abre o que faz com que se permita assim a expulsão dos gases resultantes da queima de combustível. Neste tempo do ciclo, o escape, o pistão movimenta-se para cima e expulsa para o exterior os gases de escape. Perto do fim deste tempo, a válvula de admissão abre, enquanto a de escape se fecha e todo o processo é repetido ciclicamente, [5].

Na caracterização do MD deve também ser aqui abordado o ciclo de funcionamento do pistão, o designado ciclo Diesel que os distingue dos demais ciclos presentes em outros MCI, que consiste em não existir uma fonte de ignição de flama para a combustão. Segundo os desenvolvimentos de Rudolf Diesel, este é um ciclo composto de forma básica por aumento de pressão do ar injetado desenvolvendo o aumento da carga térmica na câmara de combustão por compressão de ar, inflamando o Diesel aí injetado que, por sua vez, expandir-se-á gerando o movimento descendente do pistão, [7]. O ciclo Diesel pode ser descrito idealmente com o representado na Figura 2.2.

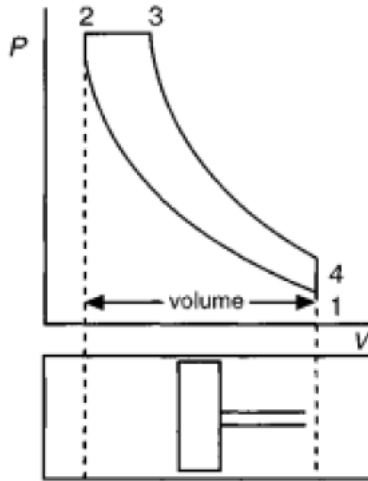


Figura 2.2 – Ciclo Diesel ideal (Adaptado de [8])

Na Figura 2.2, é apresentado o ciclo Diesel ideal, onde existe uma compressão adiabática do ar (linha 1-2), em 2 dá-se o início da injeção de combustível e da combustão, segue-se uma expansão isobárica do ar mais combustível (linha 2-3), em 3 ocorre o fim da injeção de combustível, por conseguinte existe a expansão adiabática com os gases resultantes da combustão (linha 3-4), onde em 4 se dá a abertura da válvula de escape. Sendo por fim o ciclo caracterizado pelo processo isocórico ou isométrico com a saída dos gases resultantes (linha 4-1).

No momento inicial de funcionamento, os motores atuais adquirem a compressão inicial com o auxílio dos motores de arranque. Estes induzem o movimento inicial necessário na câmara de compressão para que se gerem as condições de pressão e temperatura para o início do funcionamento dos MD. Em certos tipos de motores os construtores recorrem ao auxílio de velas de incandescência de forma a aquecer a câmara de combustão e, assim, obter a temperatura suficiente para obter a combustão inicial para o arranque do motor, [9].

2.2 – Gerador elétrico

Associados à produção de energia elétrica, as máquinas elétricas rotativas como geradores elétricos (GE) são uma peça fundamental na conversão de energia mecânica em energia elétrica.

O princípio de funcionamento de um GE surge aquando da descoberta no século XIX de fenómenos de eletromagnetismo, onde se constatou pelas experiências de Faraday, a existência de corrente elétrica num circuito quando se movimenta um íman no seu redor.

Os GE podem encontrar-se em diversos ambientes associados ao seu fim, como por exemplo, o caso de centrais de produção de energia elétrica acoplados a turbinas, ou grupos eletrogéneos, onde são acoplados a MCI.

No entanto, é de salientar a existência de diferentes tipologias de máquinas elétricas rotativas, que considerando o seu tipo de funcionamento se podem separar em dois grupos, as máquinas de corrente contínua (CC) e as máquinas de corrente alternada (CA).

Considerando o seu princípio de funcionamento, as máquinas rotativas podem-se classificar de acordo com a sua corrente de alimentação, como é apresentado na Tabela 2.1, [10]:

Tabela 2.1 – Classificação de máquinas elétricas rotativas

| Corrente Contínua (CC) | | | |
|-------------------------|-------|----------------------|-------|
| Gerador (dínamo) | | Motor | |
| Corrente Alternada (CA) | | | |
| Assíncronas (Indução) | | Síncronas | |
| Gerador | Motor | Gerador (Alternador) | Motor |

As máquinas elétricas de CA, podem possuir enrolamentos estatóricos monofásicos ou trifásicos dependendo da sua construção e, igualmente, do fim a que se destina. Em geral as máquinas síncronas são trifásicas, sendo que os geradores monofásicos são mais utilizados em pequenas potências, ou quando não existe uma rede trifásica disponível, como em áreas rurais e no dia-a-dia em fins domésticos.

Para o presente trabalho apenas serão abordados os geradores síncronos trifásicos, dado ser parte integrante do GGD sob o qual se trabalha.

A máquina síncrona é em muito semelhante a uma máquina de indução, onde o estator de um motor síncrono polifásico possui a mesma topologia do de uma máquina de indução. No entanto, o rotor de uma máquina síncrona possui, genericamente, dois enrolamentos, onde um é idêntico

ao da máquina de indução, sendo referido como enrolamento de amortecimento. O outro enrolamento, chamado de enrolamento de campo, funciona com o objetivo de garantir uma corrente contínua de modo a produzir um fluxo constante no entreferro, [11].

Neste tipo de máquina em funcionamento enquanto motor, uma das dificuldades das máquinas síncronas é o seu arranque. As opções passam por alimentar o estator com frequências baixas, de modo a que se consiga vencer a inércia do rotor, pois para frequências muito elevadas o rotor possui dificuldade em sincronizar a sua velocidade com a do campo girante dado este variar a sua amplitude máxima constantemente ao longo de 360° , havendo assim dificuldades na orientação do campo do rotor na direção do campo girante. Já a baixas frequências, a velocidade do campo girante é menor, permitindo assim ao rotor acompanhar a variação no espaço da amplitude máxima campo girante, o que leva a que o íman do rotor oriente o seu campo no sentido do campo girante, fazendo então que o rotor comece a girar.

Para o arranque, existe igualmente a opção de colocar um enrolamento no rotor, à semelhança de uma máquina de indução ou também a opção de se fazer o arranque através de uma máquina acoplada ao veio da máquina síncrona.

Como gerador, este problema de arranque não existe dado que existe uma máquina motriz acoplada que faz elevar a velocidade da máquina, como é o caso do GE tido como base para a realização deste trabalho, onde o veio do GE encontra-se diretamente acoplado ao veio do MD, assumindo este último o papel de força motriz.

Construtivamente, o rotor de uma máquina síncrona, é constituído por chapas laminadas sobrepostas que de modo geral são do mesmo material que o estator. O rotor, é normalmente constituído por um enrolamento monofásico alimentado por CC, também designado de enrolamento de campo ou de excitação, embora se assista a um progressivo uso de ímanes permanentes em substituição desse enrolamento nas unidades de menor potência. Esta parte constituinte da máquina pode possuir duas configurações, ou seja, pode assumir duas tipologias de construção, nomeadamente pólos lisos ou pólos salientes, [12].

Na máquina síncrona de pólos salientes o enrolamento é constituído por bobines concentradas em torno das cabeças polares. Os geradores em pólos salientes, são geralmente utilizados com número de pólos igual ou superior que 4, a sua baixa rotação, implica portanto a necessidade de geradores com alto número de pólos, este tipo de gerador em geral é construído com eixo vertical, possuindo grande diâmetro e pequeno comprimento axial, esta relação entre comprimento e diâmetro é ditada pela baixa rotação. Estas máquinas não são apropriadas para

funcionarem a elevadas velocidades devido à elevada força centrífuga. A resistência mecânica da máquina deste tipo é reduzida, sendo preferido o seu uso para fins com baixas velocidades de funcionamento, entre 125rpm. a 500rpm, [12].

Este tipo de máquinas pode ser aplicado na geração de energia elétrica de centrais hídricas e em GGD, [13]. Na Figura 2.3, é apresentado um exemplo de um rotor de pólos salientes com 3 pares de pólos de pólos.

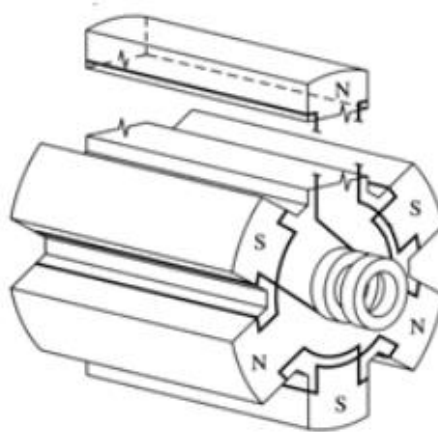


Figura 2.3 – Rotor de pólos salientes com 3 pares de pólos (extraído de [12])

Na Figura 2.3, N e S dizem respeito aos pólos magnéticos norte e sul respetivamente. Por outro lado, existe a máquina síncrona de pólos lisos, também denominadas de turboalternadores ou turbomotores. Em geral possuem topologia de eixo horizontal e têm diâmetro reduzido e comprimento axial maior que o diâmetro, devido ao facto de girarem a elevadas rotações. Este tipo de rotor, consiste num cilindro sólido de aço com um determinado número de divisões para acomodar os enrolamentos da bobine de campo. A utilização deste tipo de configuração deve-se à sua característica mais robusta, sendo assim aptos a trabalharem em rotações superiores às praticadas pelas máquinas de pólos salientes, [13]. Na Figura 2.4, é apresentado um exemplo de um rotor de pólos lisos com 1 par de pólos.

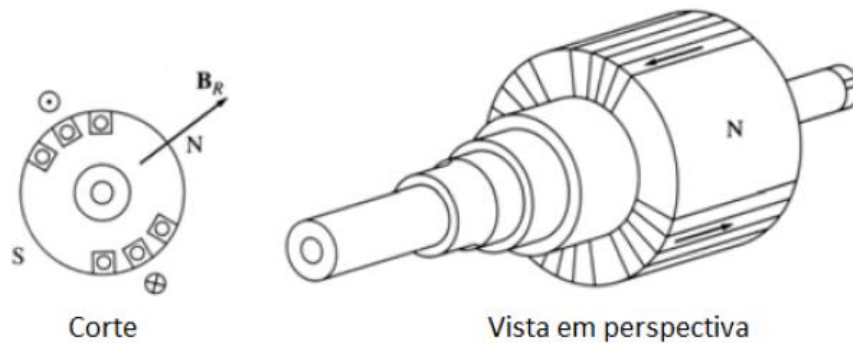


Figura 2.4 – Rotor de pólos lisos com 1 par de pólos (Adaptado de [14])

A sua utilização oferece benefícios em relação à máquina de pólos salientes na medida em que possui uma operação silenciosa a altas velocidades, um melhor balanço a nível estrutural e reduz as perdas por turbulência [11].

Em determinados tipos de máquinas como a que foi já apresentada, a corrente de excitação é fornecida através de anéis presentes no rotor, por uma fonte externa onde a retificação é feita de forma estacionária exteriormente à máquina ou mesmo através de uma fonte de corrente contínua. Outra topologia, consiste no uso de um sistema de excitação sem escovas, onde existe um sistema de corrente alternada associado a um sistema de retificação no mesmo veio que o alternador, que se denomina por excitatriz, onde, por sua vez, a corrente é fornecida diretamente ao enrolamento de campo sem auxílio a anéis, coletores e escovas. Na Figura 2.5, é representado o circuito equivalente de uma máquina síncrona com o sistema de excitação sem escovas. Onde R_f caracteriza o reóstato para realizar a regulação de tensão de saída da máquina.

No GGD utilizado neste trabalho, o GE síncrono presente, possui autoexcitação sem escovas, com um regulador automático de tensão, que controla o nível da excitação, [15].

No setor 2.3 é abordado e caracterizado o regulador automático de tensão como parte integrante de um sistema de geração de energia, mais concretamente num GGD.

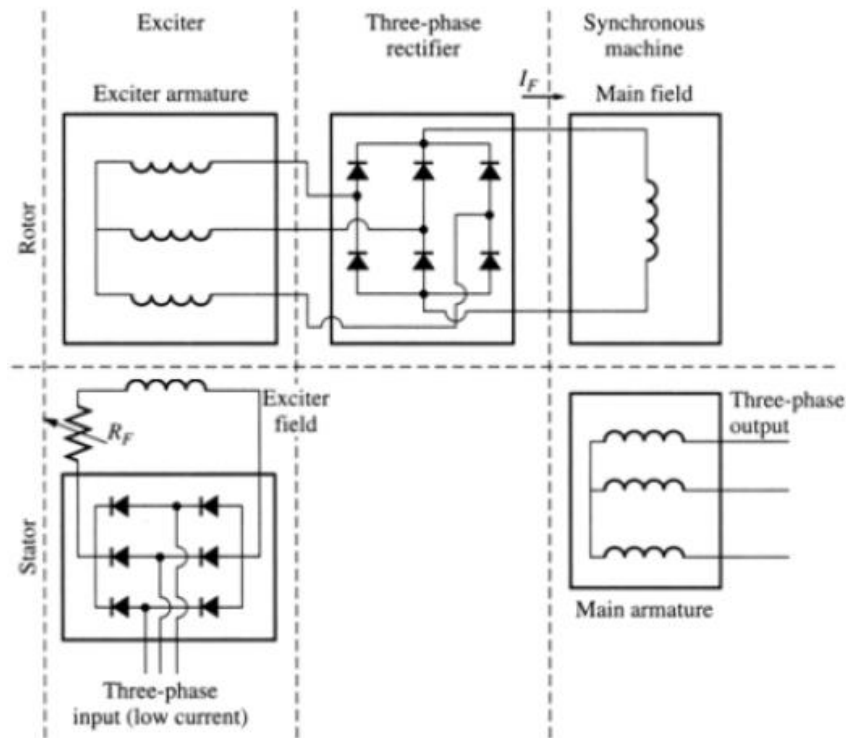


Figura 2.5 – Máquina Síncrona com excitação sem auxílio a escovas (extraído de [12])

2.3 – Controladores de tensão e frequência

Associado ao controlo de geradores síncronos, como é o caso do existente no GGD utilizado no presente trabalho, está sempre o controlo da corrente de excitação. Este controlo permite a regulação da tensão de saída do gerador eléctrico, nomeadamente da sua amplitude e também o controlo da potência reactiva produzida. Aliado também à produção de energia eléctrica está o controlo de frequência, ou seja, o controlo em primeira instância da velocidade da máquina motriz do gerador eléctrico.

2.3.1 – Regulador automático de tensão

O controlo da corrente de excitação permite a regulação da tensão de saída do gerador num determinado nível pretendido, controlando-se por sua vez a potência reactiva produzida. Os reguladores são por exemplo, utilizados em compensadores síncronos (cuja finalidade é controlar a tensão), bem como em geradores de centrais hidroeléctricas como por exemplo, para manter a tensão baixa no caso de súbita perda de carga e consequentemente sobrevelocidade. Este

controlo não influencia a potência ativa produzida, estando esta a cargo do binário produzido no veio do gerador. O controlo da corrente de excitação pode ser realizado manualmente, método amplamente utilizado em centrais térmicas e hidroelétricas antes do surgimento do controlo automático de tensão (AVR – Automatic Voltage Regulator) que fez prescindir de técnicos em permanência a fim de regular a tensão de excitação consoante, por exemplo, os níveis desejados de potência reactiva.

Como apresentado no setor 2.2, o sistema de excitação sem escovas permite o uso de um AVR. O AVR permite a aquisição do sinal de tensão a partir do enrolamento estatórico da máquina que, por sua vez, controla a excitação necessária. Este dispositivo pode também regular a excitação consoante a velocidade, prevenindo sobreexcitação a baixas velocidades, [16]. Na Figura 2.6 está presente uma representação de um gerador síncrono com excitação sem escovas e com a presença de um AVR.

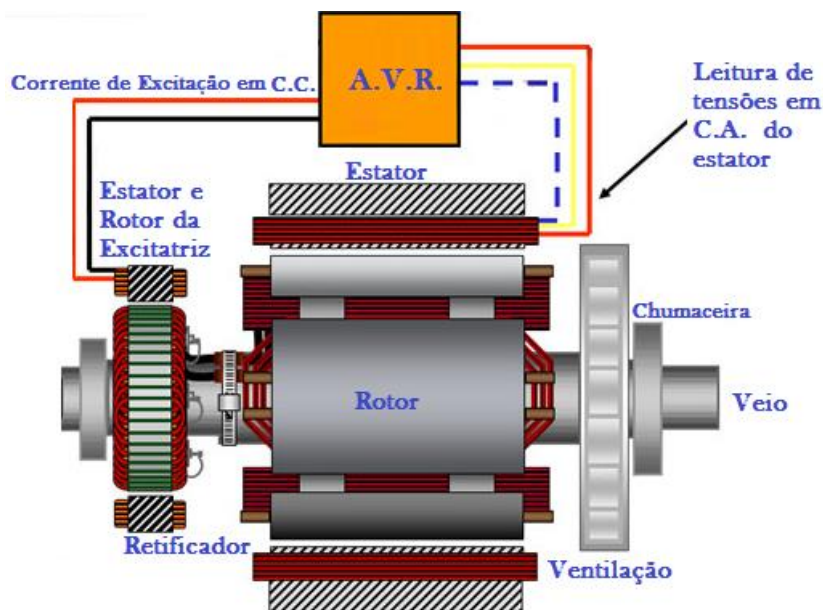


Figura 2.6 – Gerador síncrono com sistema de excitação sem escovas com AVR (Adaptado de [17])

O princípio de funcionamento de um AVR, pode ser apresentado de forma genérica no diagrama de blocos da Figura 2.7.

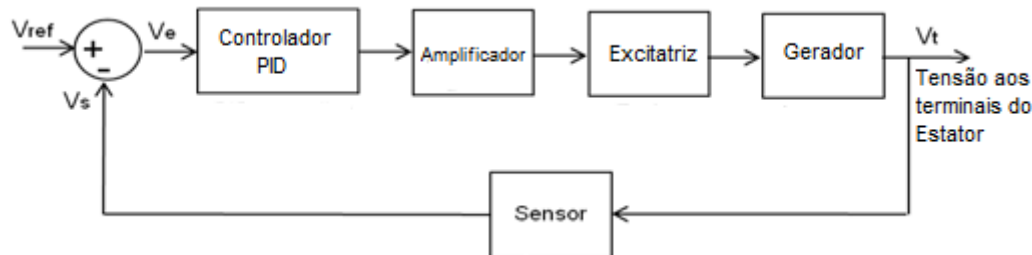


Figura 2.7 – Composição genérica de um sistema AVR (Adaptado de [18])

Tal como representado na Figura 2.7, um sistema de AVR simples contém 5 componentes básicos, tais como um controlador, um amplificador, uma excitatriz, um gerador, um sensor e um comparador que relaciona a tensão aos terminais do estator do gerador síncrono e uma referência. Da comparação resulta uma tensão de erro, que representa a diferença entre a tensão real e a de referência, esta por sua vez é sujeita a um controlador com o objectivo de diminuir o erro e por sua vez a saída é amplificada de forma a que esta resulte numa nova corrente de excitação para o gerador síncrono.

2.3.2 – Controlador de frequência

A fim de se garantir uma alimentação eléctrica dentro de determinados parâmetros, não importa apenas possuir um controlo de tensão para o gerador eléctrico, é imperativo existir um controlo na frequência gerada. Este controlo de frequência atua sobre a máquina motriz do gerador eléctrico e que permite criar o binário electromagnético necessário de forma a produzir energia eléctrica. Permite também que sejam garantidas as condições de frequência essenciais de forma a se obter uma onda de tensão de qualidade. Isto significa que, o controlador de frequência tem de garantir que em casos de variações de carga, a frequência não se altere e que sejam mantidas as características fundamentais da onda de tensão.

No caso de um GGD o controlo de frequência está a cargo do controlador de velocidade que actua no MD, que ajusta continuamente a velocidade do mesmo consoante as variações de carga existentes. Quanto mais carga eléctrica for ligada, torna cada vez mais resistente a rotação do gerador eléctrico, o que por sua vez causa o abrandamento do mesmo, a menos que a máquina motriz ajuste a potência desenvolvida e consequentemente o binário desenvolvido, corrigindo a

velocidade. O controlador de velocidade de um MCI convencional é usualmente chamado de *speed governor* (regulador de velocidade). Os reguladores de velocidade podem tomar diversas formas, sendo o conceito fundamental, necessariamente o mesmo.

De forma a controlar a velocidade do MCI, o regulador de velocidade controla a quantidade de combustível injectada, variando a posição de uma cremalheira ou régua no interior do mesmo. Esta régua está também ligada à alavanca do acelerador, sendo por sua vez controlada por um actuador, como por exemplo um solenóide, componente presente no sistema de regulação de velocidade do MD utilizado no presente trabalho. O actuador é controlado de forma a que se atinja uma determinada velocidade do MCI, através de um sinal eléctrico modulado por largura de impulso e que é calculado por um controlador PID. Este sistema possui uma rectroacção de velocidade, através da leitura da velocidade real com auxilio por exemplo de um sensor magnético, [19]. Na Figura 2.8, está presente a caracterização de um regulador de velocidade com controlador PID.

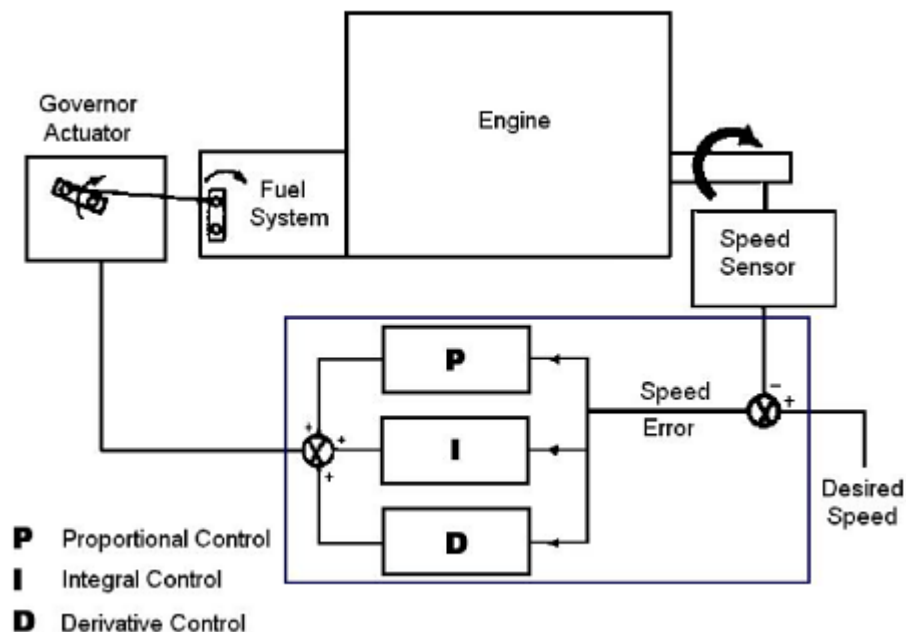


Figura 2.8 – Regulador de velocidade com controlador PID (Extraído de [20])

De acordo com a representação da Figura 2.8, o controlador de velocidade permite que a partir de uma velocidade de referência, a frequência da onda de tensão se mantenha constante nas condições de colocação e deslastre de cargas eléctricas, mas também permite o controlo da máquina motriz na situação de arranque.

2.4 – Técnicas de modelação do grupo Diesel

O uso de modelos matemáticos permite que os resultados obtidos em ensaios realizados a um determinado sistema sejam replicados. Para o caso de estudo importa referir as técnicas de modelação subjacentes à caracterização pretendida do GGD, na medida em que devem ser considerados modelos ou formas de modelar o sistema em causa.

No que diz respeito à modelação de um motor de combustão, esta trás vantagens ao nível do desenvolvimento de motores, visto que as simulações possíveis são especialmente adequadas ao permitirem um extensivo estudo de parâmetros, em alternativa à construção e investigação de inúmeros protótipos físicos. As vantagens da modelação de motores consistem na possibilidade de estudos que podem ser feitos a cada variável, no elevado número de condições fronteira que podem ser analisadas pela interação com outros componentes, na capacidade de separação de cada subprocesso da fase de combustão de um motor, na informação detalhada que se pode obter como saída e no tempo e custo que não é despendido.

Dependendo da aplicação e finalidade requerida, existem diferentes modelos que permitem a caracterização do motor de combustão ou seus processos de funcionamento. Destes diferentes tipos de modelos podem-se distinguir em cinco categorias:

- Modelos termodinâmicos;
- Modelos multidimensionais CFD (computational fluid dynamics);
- Modelos COM (control-oriented models).
- Modelos fenomenológicos;
- Modelos de caixa preta;

Os modelos termodinâmicos baseiam-se segundo a 1ª e a 2ª lei da termodinâmica, e são modelos que possuem elevada aplicabilidade, de onde se retiram os parâmetros necessários ao ciclo de funcionamento do sistema em estudo. Inicialmente foram aplicados no ciclo ideal Diesel na década de 50, onde sofreram uma evolução ao nível da sua aplicação, que se estendeu aos componentes que integram o sistema físico já na década de 60. Nas décadas seguintes estes modelos evoluíram para modelos multidimensionais, que possibilitam uma maior abrangência e detalhe dos processos de funcionamento do motor. Este tipo de modelos é utilizado em problemas específicos nas áreas de projeto e conceção de motores, onde os detalhes acerca do transporte de fluidos são relevantes ao nível da geometria dos materiais.

Com o incremento de componentes introduzidos como o sistema de alimentação por turbocompressor ou mesmo alterações no que diz respeito à forma de admissão de combustível, originaram-se derivações dos modelos anteriormente utilizados. Exemplo disso são os modelos *quasi-steady*, *Filling and Emptying* e dinâmica de ondas. No caso dos modelos do tipo *Filling and Emptying* estes são usualmente utilizados para descrever e estudar o cilindro do motor, enquanto processos detalhados do processo de admissão requerem o uso de modelos da dinâmica de ondas, e para descrever válvulas ou orifícios de escape recorrem-se aos modelos *quasi-steady*, [21].

A utilização de computadores permite um processo mais ágil no manuseamento dos modelos, onde a sua complexidade matemática é elevada, mas também os custos associados ao seu uso são inferiores em relação a estudos reais. Os programas informáticos usados na otimização dos MCI baseiam-se no estudo dos processos de combustão, onde sofreram uma evolução ao nível da sua capacidade de estudo de transitórios, [22].

Os primeiros programas informáticos de simulação não contemplam a alteração de submodelos responsáveis pela caracterização de processos específicos no funcionamento de um MCI, e a necessidade de explorar diferentes topologias e aspeto dos MCI fez desenvolver outros tipos de programas informáticos como o SPICE, [23] e IRIS. Estes programas permitem a alteração dos submodelos o que dá uma liberdade superior no desenvolvimento de MCI, [24].

Para modelar um sistema através de modelos termodinâmicos deve ser admitido que o sistema é aberto, como por exemplo o volume do cilindro, válvulas de admissão e escape. As equações importantes neste tipo de modelos são referentes à conservação de massa e energia. Se todas as transferências de massa forem conhecidas dentro e fora do cilindro durante a admissão e escape, bem como o calor transferido entre os gases e a cabeça do cilindro, pistão, e os restantes elementos do cilindro, as equações da conservação de massa e energia permitem determinar a pressão e o trabalho desenvolvido pelo pistão. Modelos deste tipo foram desenvolvidos e usados extensivamente para a previsão das características de funcionamento dos MCI, nomeadamente potência desenvolvida, pressão média, consumo específico de combustível, seguindo as alterações químicas e termodinâmicas do fluido de trabalho ao longo dos processos de admissão, compressão, combustão, expansão e escape.

O ponto de partida para a simulação do ciclo de combustão é a primeira lei da termodinâmica para sistemas abertos, sendo aplicada para o volume do cilindro em situações de admissão, compressão, combustão, expansão e escape [6]. Este tipo de modelos também pode ser

desenvolvido ao nível do estudo de transitórios no processo de funcionamento do MCI. Entende-se por transitório, uma situação de arranque do MD, uma variação de carga a que o motor é sujeito, oscilações de temperatura, etc. Na Figura 2.9, está presente um exemplo da aplicação de modelos termodinâmicos em comparação com os modelos de Vibe, no cálculo da temperatura no interior de um cilindro aquando do processo de injeção de ar e gasolina.

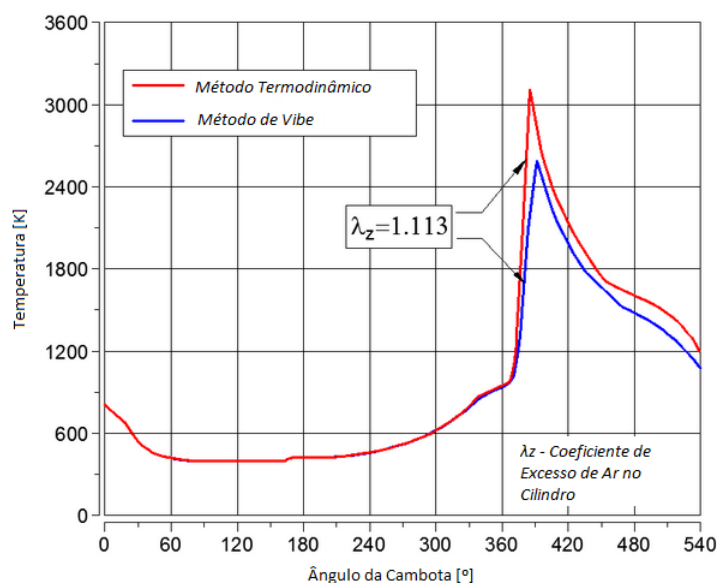


Figura 2.9 – Exemplo de Aplicação de Modelo Termodinâmico em comparação com Modelo de Vibe no cálculo da temperatura resultante da injeção de ar e gasolina num cilindro (adaptado de [25])

Os modelos multidimensionais CFD são baseados em soluções locais de conservação de massa, energia, momentos, e incluem submodelos para os fenómenos de combustão e gases. Estes modelos possuem um uso extenso na apreciação dos mecanismos internos da admissão de combustível, no entanto, possuem uma compreensão complexa durante a simulação completa do MD, [14]. Os resultados que se obtêm deste tipo de modelos permitem verificar que existem detalhes no processo do fluxo de admissão que são determinantes na performance do motor, como por exemplo a forma de injeção de combustível. Este tipo de modelos permite fazer o estudo no que diz respeito a problemas de mecânica de fluídos, onde na temática dos MCI a densidade de fluídos é variável, como é o caso do verificado nos processos de admissão e distribuição no combustível no motor. Na década de 90 estes modelos foram aplicados em estudos referentes a MD, onde os submodelos dos processos físicos da combustão de combustível ainda estavam em fase de desenvolvimento, [26].

O uso de submodelos para os processos que ocorrem em tempos e espaços muito curtos são importantes, como é o caso de atomização, vaporização de combustível, ignição, transferências de calor, emissões e turbulência. Existem vários programas informáticos de onde é possível realizar trabalhos usando este tipo de modelação, como é caso do KIVA, FIRE e Star-CD, onde por exemplo no KIVA é possível abordar submodelos e ter acesso ao código, [26]. Na Figura 2.10, é apresentado um exemplo de aplicação dos modelos multidimensionais CFD no programa de simulação STAR-CD, acerca do fluxo de ar num cilindro aquando da introdução de combustível.

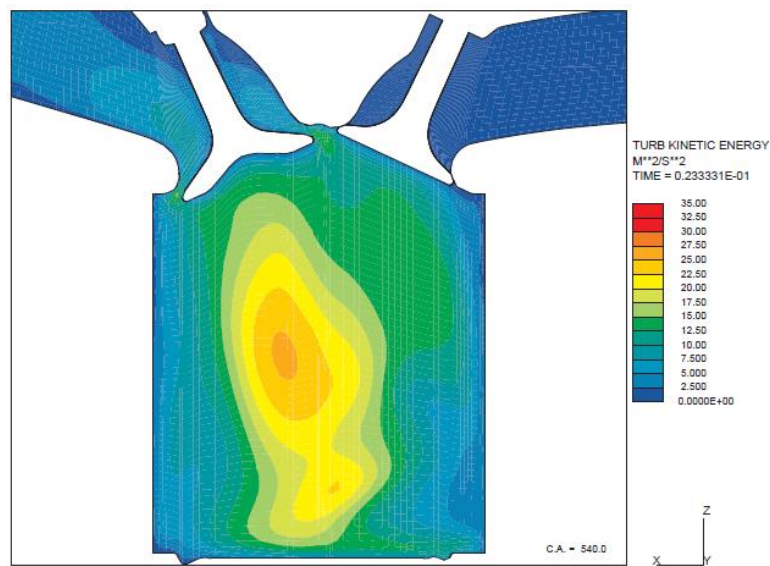


Figura 2.10 – Exemplo de aplicação de modelos multidimensionais CFD de realizado no STAR-CD (extraído de [27]).

Este tipo de modelos possui uma vasta gama de aplicações no que diz respeito a fluídos, e o desenvolvimento desta tecnologia permitiu que fossem possíveis estudos ao nível da influência que as forças resultantes da aceleração possuem nas partículas que constituem os fluídos existentes nos motores. Este fenómeno pode criar aglomerados de partículas em determinadas regiões dos componentes dos motores, [28]. A tecnologia em questão também permite estudos e desenvolvimento de programas informáticos que possibilitam a utilização de malhas de elevada precisão na modelização de processos acerca da ignição do combustível, onde a vaporização de combustível para combustão pode ser estudada, [29]. As capacidades e as potencialidades que este tipo de modelização possui, faz com que sejam utilizadas na optimização de parâmetros e a sua aplicação começa a ser crescente na indústria aeroespacial. No entanto, os tempos de processamento dos modelos ao nível computacional são bastante elevados podendo em certos

casos atingir os meses, o que faz com que mais recentemente existam desenvolvimentos de técnicas que permitam a sua redução, [27].

Referente aos modelos COM, esta família de modelos pode ser comparada a outros modelos usados no projecto e otimização de MCI. No entanto, são usualmente utilizados nos mecanismos de controlo dos processos que envolvem o funcionamento do motor. Parâmetros como o ângulo de abertura das válvulas e tempos de atuação, podem ser definidos segundo este tipo de modelos, [30]. Os modelos deste tipo são aplicados usualmente a representações de motores com comportamento uniforme e carga homogénea. O desenvolvimento deste tipo de modelos permitem a origem de modelos lineares que tem como objetivo caracterizar e englobar processos não lineares como por exemplo a combustão por velas, [31].

Nos modelos COM são englobados os modelos de valor médio, que por exemplo representam o sistema de ar, determinando a quantidade de ar que é introduzida no cilindro, o sistema de combustível onde é determinada a quantidade de combustível que é introduzida no cilindro. Que representam o sistema de geração de binário onde é determinado o binário produzido com o ar e combustível presente no cilindro, o sistema inercial do veículo em que é determinada a velocidade do veículo e o sistema térmico do motor ou mesmo o sistema das emissões dos gases de escape.

Estes modelos possuem uma precisão razoável, associados a uma baixa complexidade computacional, sendo descritos por equações diferenciais não lineares. O grupo de modelos de eventos discretos, integra-se nos modelos COM. Os modelos de eventos discretos destinam-se a descrever o controlo eletrónico que ocorre em amostras de tempo não contínuos, [32]. Na Figura 2.11, apresenta-se um exemplo de aplicação de modelos COM, onde é caracterizada a pressão no interior de um cilindro e a pressão da admissão, em função do ângulo que relaciona a posição do cilindro em relação à cambota.

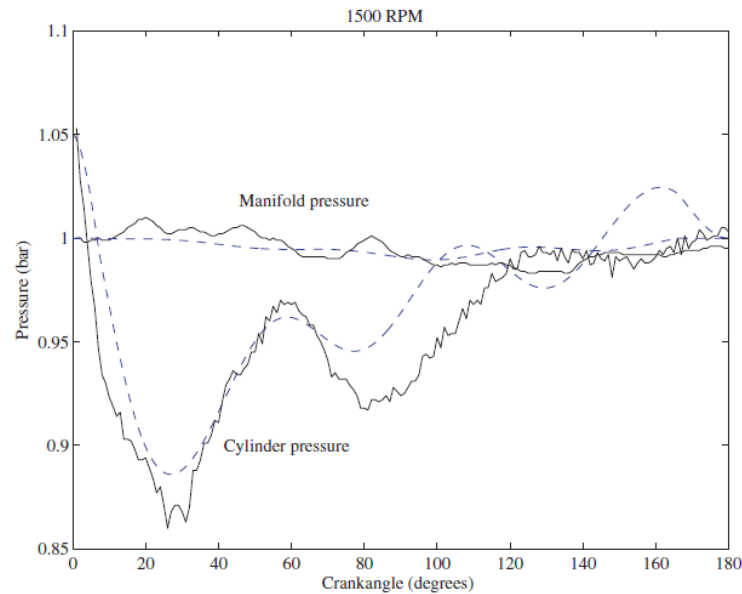


Figura 2.11 – Exemplo de aplicação de modelos COM (extraído de [30]).

No que diz respeito aos modelos fenomenológicos, estes são baseados em submodelos físicos e químicos para descrever fenómenos locais, [14].

A categoria dos modelos fenomenológicos permitem descrever processos isolados no que diz respeito ao processo de combustão de um MCI. Este tipo de modelos permite a representação de processos como a injeção de combustível, a formação da mistura ar-combustível, a libertação e transferência de calor e a formação de emissões de escape, [33]. Como já foi verificado na década de 80, o uso de modelos multidimensionais possibilitam a obtenção de informação detalhada acerca dos processos ocorridos no cilindro, no entanto requerem elevados recursos computacionais e longos tempos de operação, [34].

O desenvolvimento dos modelos fenomenológicos permite que estes sejam aplicados nos modelos CFD, onde possibilitam um acréscimo de detalhe e informação a este tipo de modelação, tendo em vista a sua otimização como é o caso do fenómeno de autoignição e da criação de fuligem resultante da combustão, que recentemente foram alvos desta aplicação, [35] [36].

Os modelos fenomenológicos por si só, são caracterizados por serem mais facilmente compreendidos, comparados com os modelos termodinâmicos e consomem menos recursos computacionais em relação aos modelos CFD [36].

Os métodos de modelação apresentados permitem desenvolvimentos ao nível de tecnologias acessíveis a todos, como é o caso da motorização automóvel, que é um exemplo claro de

progresso e otimização, como se pode verificar pela evolução das conhecidas normas relativas às emissões “Euro”.

A modelação utilizada neste trabalho, para a caracterização do MD, é baseada num sistema de caixa preta, onde apenas é caracterizada a resposta de velocidade do MD por intermédio de uma aproximação da resposta do sistema a um sistema de segunda ordem.

Partindo deste princípio, não terão ênfase na modelação, nem serão objeto de estudo do presente trabalho as características mecânicas do MD, nem a termodinâmica do MD.

O tipo de modelação utilizada, para efeitos de emulação, baseia-se num modelo de caixa preta, na medida em é considerado que todo o MD é uma caixa, onde apenas é retratada a sua saída de velocidade, caracterizando-se o comportamento desta quando sujeita a diferentes situações de funcionamento. Este princípio é descrito na Figura 2.12:



Figura 2.12 – Modelo de caixa preta considerado para efeitos de emulação do MD

De acordo com a Figura 2.12, o princípio de funcionamento baseia-se na caracterização da saída de velocidade perante um determinado binário imposto ao MD.

Para este método de modelação, recorrem-se a equações com um polinómio de segundo grau, para caracterizar um sistema oscilatório amortecido, não sendo assim utilizados os métodos de caracterização completa do sistema. São assim retratadas as diferentes respostas de velocidade do sistema, com equações matemáticas genéricas que podem caracterizar qualquer resposta de outro sistema que se assemelhe a este. No setor 3.3.2, é então apresentada a caracterização do método utilizado.

No conjunto do GGD utilizado neste trabalho, engloba-se também a existência de um GE síncrono, cujo funcionamento é igualmente alvo de modelação matemática de forma a se obter as suas características elétricas e as perdas do mesmo. Possuindo o sistema caracterizado é possível assim, obter o mapa de eficiência do MD.

Assim, os modelos matemáticos de máquinas elétricas são úteis para a análise da máquina em diversas situações, tanto em regime dinâmico como em regime permanente, tornando possível

caracterizar o seu comportamento. No que se refere à máquina síncrona de pólos lisos, a modelação pode ser feita recorrendo ao seu esquema equivalente por fase da Figura 2.13.

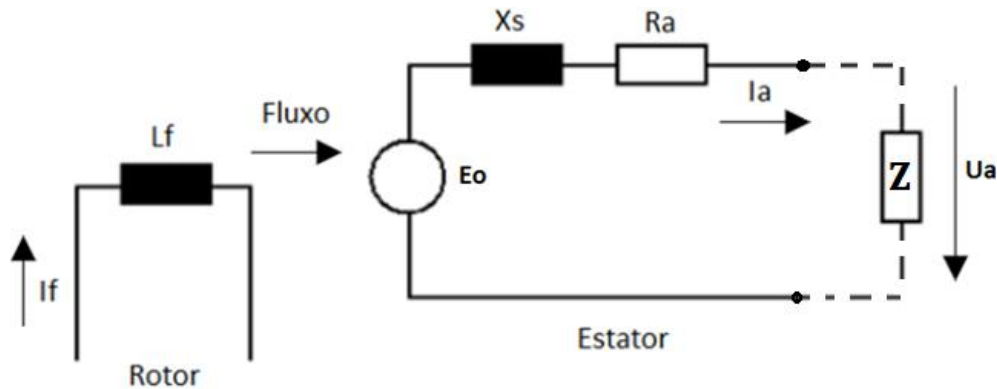


Figura 2.13 – Esquema equivalente da máquina síncrona

Na Figura 2.13, obtêm-se o modelo em regime permanente da máquina, onde a corrente de excitação, I_f , no circuito rotórico cria um fluxo magnético criado através da indutância rotórica, L_f . Este irá induzir uma força eletromotriz, E_0 , originando por sua vez, caso o circuito esteja fechado por uma carga, Z , uma corrente, I_a , nos enrolamentos do estator e consequentemente uma tensão, U_a , aos seus terminais, com queda de tensão a montante na resistência, R_a , e indutância estatória, L_a . Neste modelo não são representadas indutâncias mútuas e fluxos entre enrolamentos.

Por outra forma, com base num sistema de coordenadas, é possível representar a máquina elétrica dispondo os enrolamentos segundo um eixo direto e em quadratura possibilitando uma análise detalhada de cada grandeza da máquina.

Na Figura 2.14, é mostrado o esquema equivalente da máquina síncrona segundo o eixo dq .

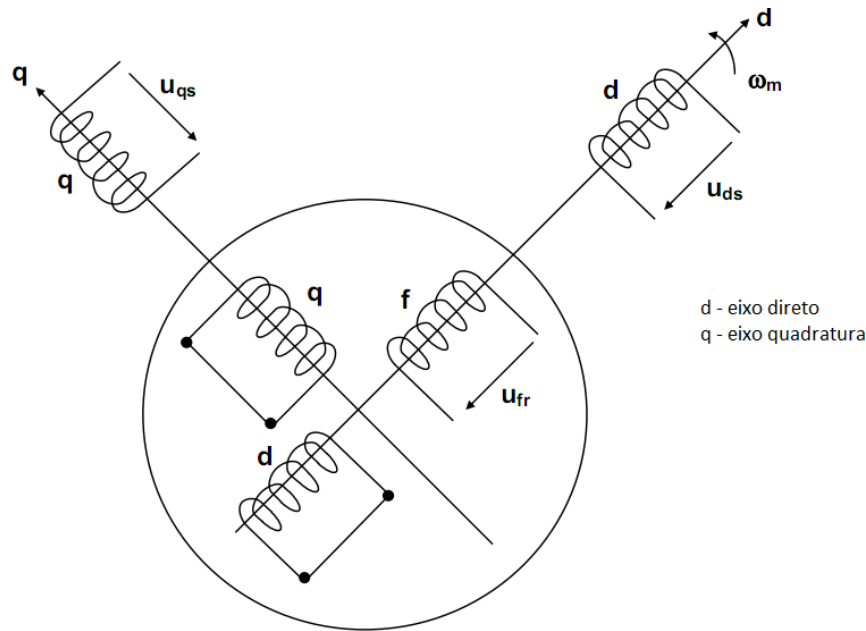


Figura 2.14 – Esquema equivalente da máquina síncrona segundo o eixo dq num referencial solidário com o rotor

Retira-se da Figura 2.14 que:

- ω_m – Velocidade de rotação do motor
- U_{ds} – Tensão do estator segundo o eixo direto
- U_{qs} – Tensão do estator segundo o eixo em quadratura
- U_{fr} – Tensão no rotor resultante da força eletromotriz induzida

A partir da representação feita na Figura 2.14 retiram-se com auxílio à forma matricial, as equações elétricas com as várias influências que cada grandeza contribui no funcionamento dos restantes. Este modelo permite obter os fluxos de ligação da máquina, entre outros parâmetros importantes ao conhecimento do seu funcionamento, [37].

O mapa de eficiência, permite extrair informações ao nível dos pontos ótimos de funcionamento e do comportamento do MD em várias condições de funcionamento, tal como o que é desejado para este trabalho.

Na Figura 2.15, é apresentado um exemplo de um mapa de eficiência em função do binário e da velocidade.

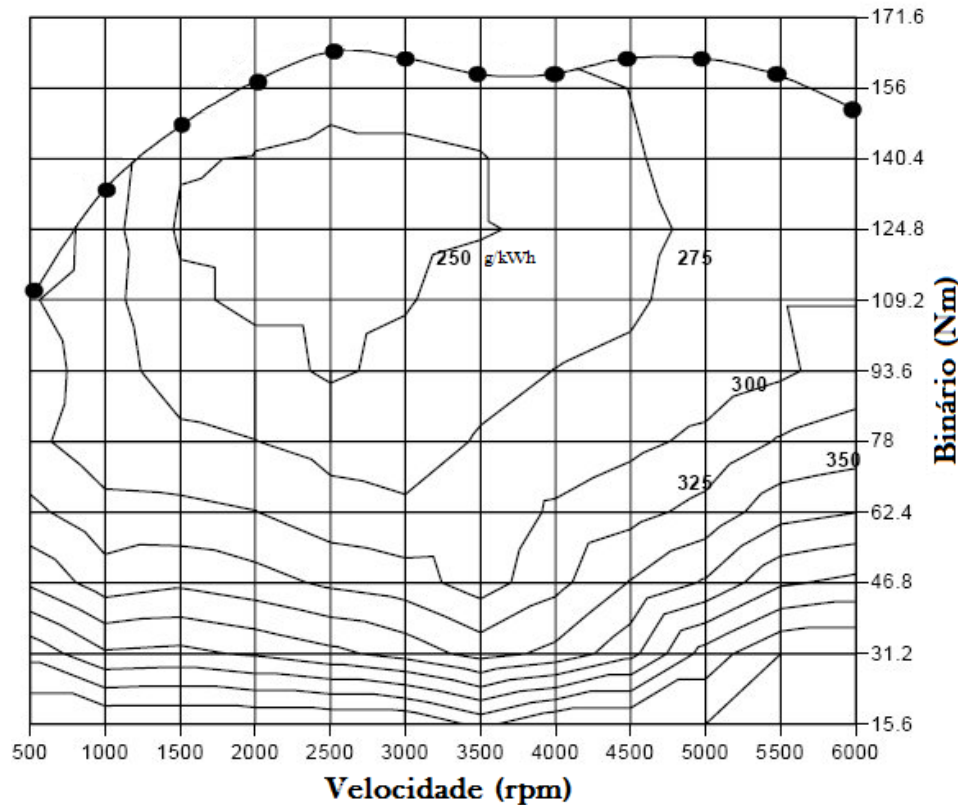


Figura 2.15 – Mapa de eficiência de consumo específico de combustível em função do binário e velocidade desenvolvidos por um MD (Adaptado de [38])

Na Figura 2.15, apresenta-se a característica de funcionamento de um MD, que é constituída por curvas de nível referentes ao consumo específico de combustível definido em gramas por quilowatt-hora produzido, em função da velocidade e binário exercido pelo MD. O consumo específico corresponde ao consumo de combustível por unidade de potência produzida numa hora.

No capítulo 3, é caracterizado e elaborado o modelo matemático de um GGD, com a construção do mapa de eficiência do MD utilizado neste trabalho, construído com base nos valores experimentais obtidos nos ensaios realizados ao GGD em estudo neste trabalho.

2.5 – Emulação de motor de combustão interna

A execução deste trabalho, tem como seu principal objetivo o da obtenção da resposta de um MD, através de uma máquina elétrica, nomeadamente um motor de indução trifásico, emulando o seu comportamento. Para isto, é necessária a utilização de um conversor de potência, que será

necessariamente alvo de parametrização e de comandos para que este possua a capacidade de caracterizar a resposta do MD. Os comandos enviados, terão como base o modelo matemático criado a partir dos ensaios experimentais realizados ao MD, quer em regime permanente, quer em regime dinâmico.

A partir dos ensaios realizados e apresentados no capítulo 4, são determinados os parâmetros integrantes do modelo matemático escolhido para caracterizar a resposta obtida. Estabelece-se então com base neste modelo um conjunto de condições, como velocidade e binário de carga desenvolvidos, sob as quais são recriadas as respostas do MD. Por sua vez, estabelece-se a comunicação com os conversores eletrônicos de potência, para que este controle o motor de indução segundo cada condição e assim seja possível validar o modelo.

Dado o objetivo deste trabalho passar pelo desenvolvimento da resposta de um MD num motor de indução trifásico, torna-se necessário apresentar o que já existe até então sobre o tema de emulação com motores elétricos. Num trabalho semelhante desenvolvido por A.R. Cooper em [39], obteve-se a resposta mecânica de um GGD, utilizando um motor de indução trifásico e um motor de CC, controlados por intermédio de um conversor de potência. O objetivo do estudo de A.R. Cooper é idêntico ao do presente trabalho, no entanto este não passa apenas pela emulação de um MD e da carga elétrica aplicada ao GE acoplado, mas sim de um MD turbo-alimentado, onde a dinâmica do motor é modelada para determinar a velocidade do motor partindo da quantidade de combustível entregue a este.

O GGD tido como base no trabalho de A.R. Cooper, possui 150kW e 900cm³ de cilindra, [39].

Segundo A.R. Cooper, três fatores determinantes que têm influência no combustível entregue ao MD são, [39]:

- Ação do regulador: Este calcula a diferença entre a velocidade desejada e a velocidade real, ou seja, o erro existente entre elas, passando a informação a um controlador PID. O resultado de saída é a quantidade de combustível a ser entregue.
- Limite de binário: Este consiste na limitação da quantidade de combustível que é entregue ao cilindro num ciclo de combustão. É em função da velocidade do motor. Previne estragos mecânicos motivados por binários elevados.
- Limite de fumo: É feita a medida da pressão do ar no coletor de admissão de forma a determinar a quantidade de ar existente. Este método é aplicado ao valor calculado

pelo regulador, de forma a prevenir a entrega de combustível sem que haja ar disponível para a sua combustão.

O controlador PID que intercede na quantidade de combustível entregue ao MD, que limita o erro existente entre os valores desejados para a velocidade e a velocidade real foi considerado para efeitos de estudo como sendo discreto no tempo. Este controlador é sujeito aos limites de fumo e binário.

Considerando a velocidade do MD a saída do sistema, a dinâmica deste é assim modelada de forma a determinar a velocidade do MD a partir da quantidade de combustível injetado.

A Figura 2.16, mostra num diagrama de blocos uma função de minimização, de como os limites afetam a quantidade de combustível entregue ao motor.

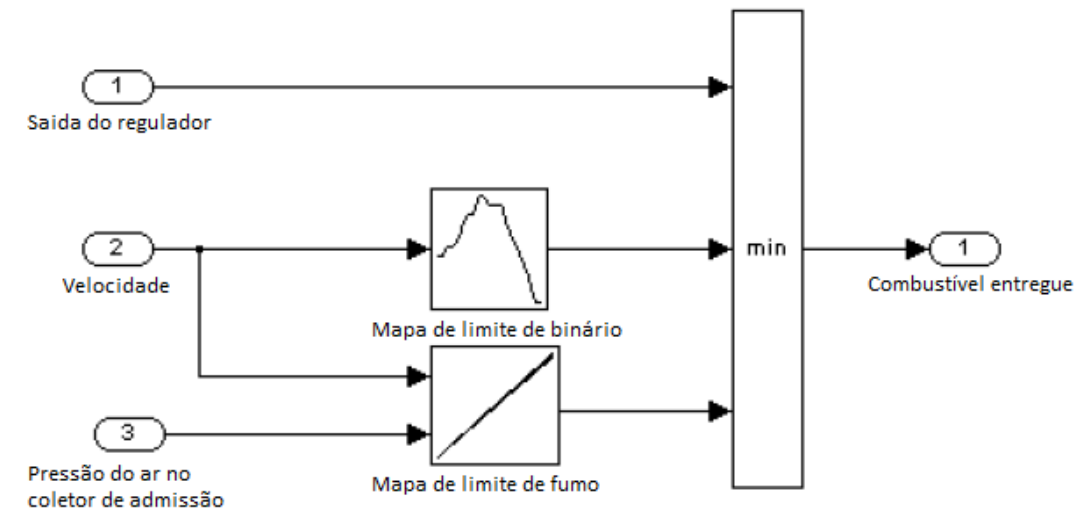


Figura 2.16 – Diagrama de blocos de função de minimização de combustível, (adaptado de [39])

O autor cria também um modelo que caracteriza a dinâmica do turbocompressor no coletor de admissão de ar, representado no diagrama de blocos da Figura 2.17:

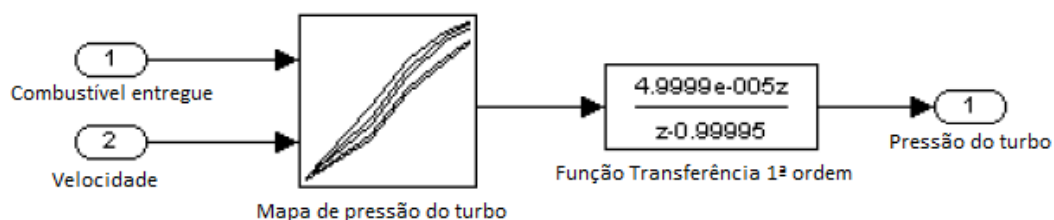


Figura 2.17 – Diagrama de blocos do modelo do turbocompressor, (Adaptado de [39])

Com os modelos do GGD criados em Matlab/Simulink®, estes são implementados e testados numa bancada de ensaios utilizando uma saída analógica de uma placa de aquisição de dados *National Instruments 6025E*, para comunicar em tempo real com o conversor de potência do motor de CC utilizado. Na Figura 2.18, é representado um esquema da bancada de ensaios criada.

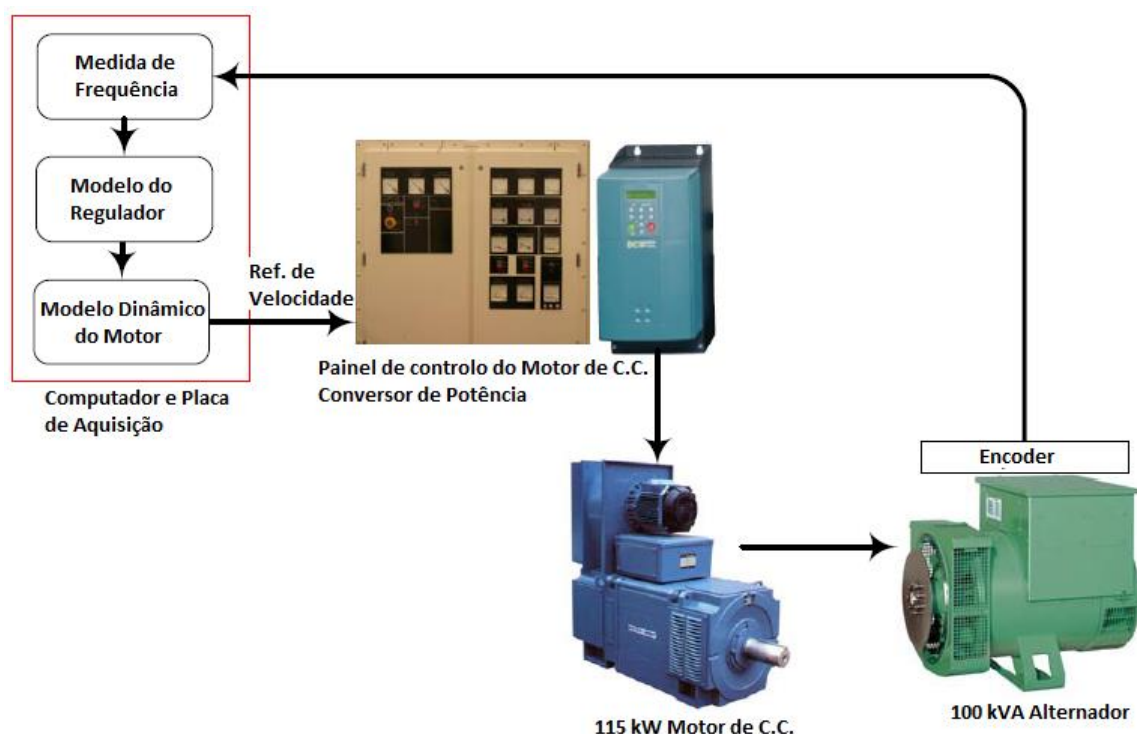


Figura 2.18 – Esquema de bancada de ensaios de emulação, (Adaptado de [39])

A modelação de um MD, pode passar simplesmente pela demonstração da característica de velocidade em regime permanente de um motor Diesel, característica esta que pode ser aplicada a diversos tipos de máquinas elétricas com o devido recurso a elementos que permitam a sua implementação, como por exemplo um conversor de potência e um *software* de simulação como o Matlab®.

Num estudo mais abrangente elaborado por R. Sehab em [40], é desenvolvida a emulação não apenas de um MCI, mas sim de um veículo com propulsão a partir de um MCI. Para isto são considerados para emulação, os seguintes componentes principais apresentados na Figura 2.19:

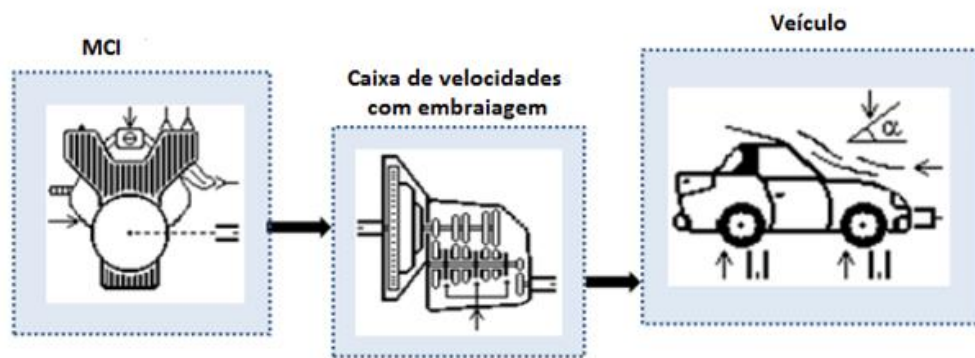


Figura 2.19 – Esquema dos principais componentes alvos de emulação (Adaptado de [40])

No que diz respeito ao veículo, são considerados pelo autor todas as forças resistivas aplicadas ao veículo, incluindo a sua inércia e travagem a ele aplicada. No estudo de R. Sehab, é utilizado um veículo Peugeot 309 em que o construtor já forneceu a curva de binário máximo do motor vs. velocidade, representada na Figura 2.20.

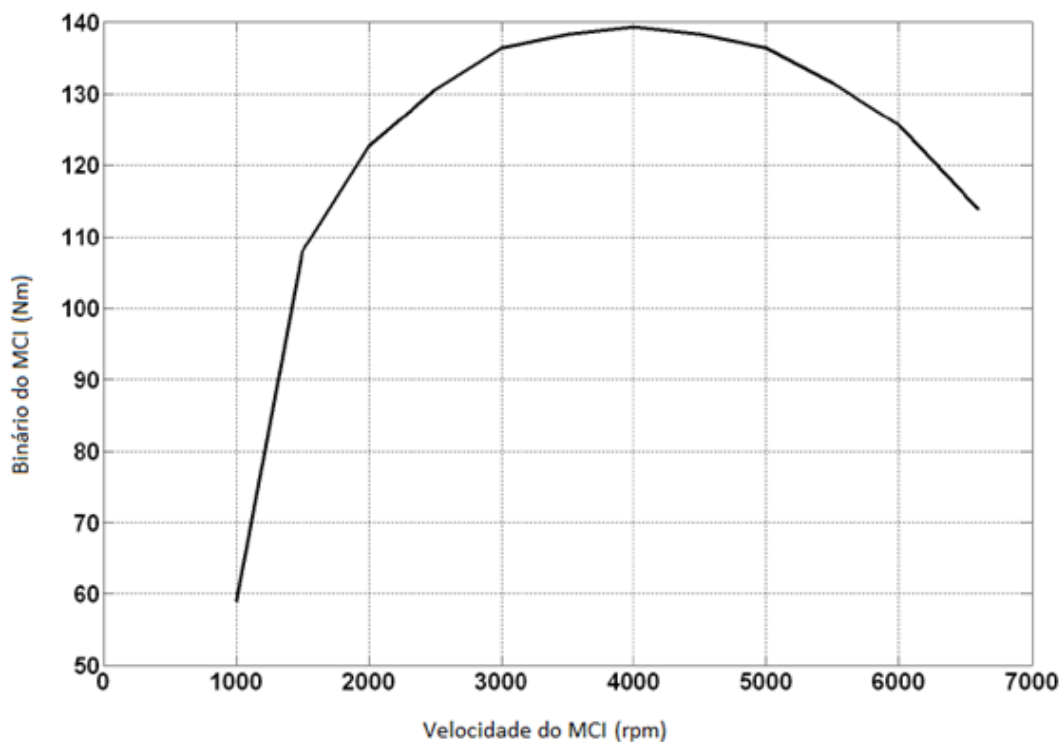


Figura 2.20 – Curva de binário máximo (Adaptado de [40])

Para a emulação são utilizados um motor de indução e um motor de CC, controlados com auxílio de conversores de potência e com comunicação feita a partir de Matlab/Simulink. Os motores

encontram-se com os veios acoplados entre si, em que um emula o comportamento do MD e caixa de velocidades, enquanto o segundo emula o comportamento da carga aerodinâmica aplicada ao veículo, a sua inércia e travagens aplicadas ao mesmo.

Na Figura 2.21, estão representados os componentes utilizados para a realização desta emulação, com foco para as caracterizações realizadas por cada motor.

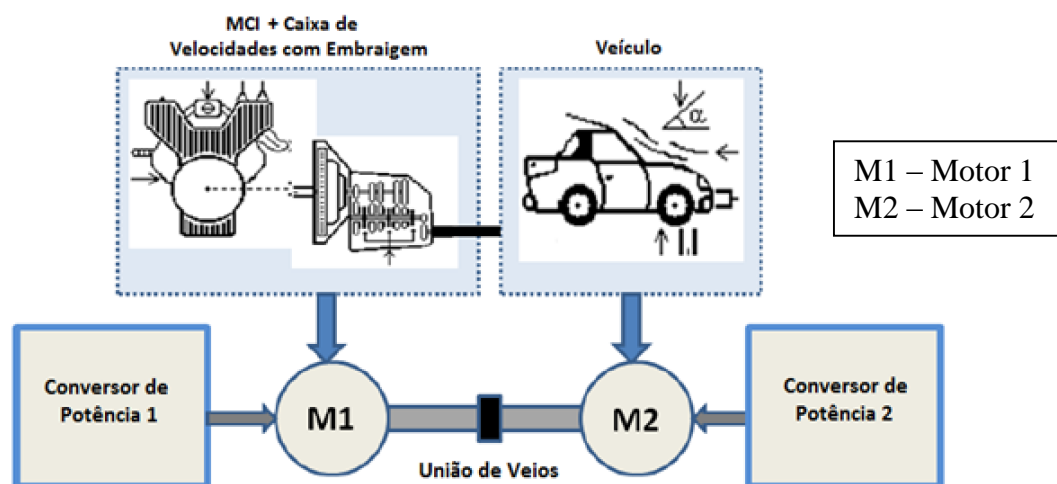


Figura 2.21 – Emulação de um veículo por dois motores elétricos (Adaptado de [40])

O processo de emulação neste trabalho, consiste como à semelhança dos trabalhos desenvolvidos por A.R.Cooper e R.Sehab, no uso de um motor elétrico controlado por um conversor de potência, onde é pretendido que este descreva o comportamento do MD presente no GGD em estudo, perante diferentes condições em regime permanente e em regime dinâmico. No capítulo 4 será abordado o processo de emulação do sistema, através de um programa de comando e monitorização construído para o efeito.

2.6 – Conclusões

Neste capítulo apresentou-se uma introdução aos tipos de MCI, com especial incidência ao MD dado ser o tipo de MCI que compõe o GGD utilizado neste trabalho. O conhecimento do seu funcionamento é importante na medida em que permitiu entender de forma mais correta e incisiva os processos envolvidos na variação de velocidade, mas também na análise ao combustível consumido. Apresentou-se o estado da arte das máquinas elétricas rotativas, onde foi caracterizado o tipo de gerador presente no GGD deste estudo e sua tipologia de excitação,

fatores que são importantes aquando do processo de determinação e análise dos parâmetros elétricos da máquina em causa. O presente capítulo permite também tomar conhecimento dos tipos de modelação associados à análise de um MCI, mas também contextualizar o tipo de modelação utilizada. Por fim é apresentado o estado da arte referente aos processos de emulação já existentes, realizados por diferentes autores e com diferentes infraestruturas ao que este trabalho diz respeito.

CAPÍTULO 3

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE BASE EXPERIMENTAL DO GRUPO DIESEL

Resumo

Neste capítulo serão apresentadas as características do grupo gerador Diesel tido como base experimental neste estudo. Dos ensaios necessários, à construção do mapa de eficiência do motor de combustão interna Diesel e do seu modelo em regime dinâmico.

3 – MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE BASE EXPERIMENTAL DO GRUPO DIESEL

3.1 – Descrição do grupo Diesel

Para a realização deste trabalho, é utilizado um GGD composto por um GE síncrono que é acoplado mecanicamente a um MD através do veio. Todo o conjunto que forma um GGD foi cedido pela AtlasCopco e é um produto que é parte integrante do mercado de GGD da marca, identificado como QAS20, de 20kVA de potência aparente. Este não possui caixa de velocidades sendo a velocidade no MD igual à velocidade do gerador síncrono. Possui para a proteção das cargas e para o bom funcionamento do grupo, controladores de tensão e frequência que atuam no controlo da máquina inibindo o seu funcionamento consoante determinados parâmetros que serão explicados ao longo do capítulo 3. O controlo do grupo, é feito a partir de uma consola que faz a interface para que o utilizador controle parâmetros como os intervalos de tensão e frequência a que o grupo pode funcionar sem que seja inibido o seu funcionamento, mas também por exemplo possui a informação da quantidade de combustível disponível.

Na Figura 3.1, é apresentado o GGD que foi tido como base no desenvolvimento desta dissertação.



Figura 3.1 – GGD AtlasCopco QAS20

3.1.1 – Motor Diesel

Neste trabalho, teve-se como base um GGD de 20 kVA de potência aparente e para tal este possui um MD com a capacidade de fornecer essa potência aos 50 Hz e 60 Hz que são as frequências utilizadas nos mercados onde este grupo gerador se insere. O MD presente no GGD utilizado é um *Kubota V2403M-BG* que possui como características gerais, injeção direta associada a injetores mecânicos, aspiração natural, 4 cilindros e com 2400 cm³ de cilindrada. Na Figura 3.2 é apresentado o MD em questão.

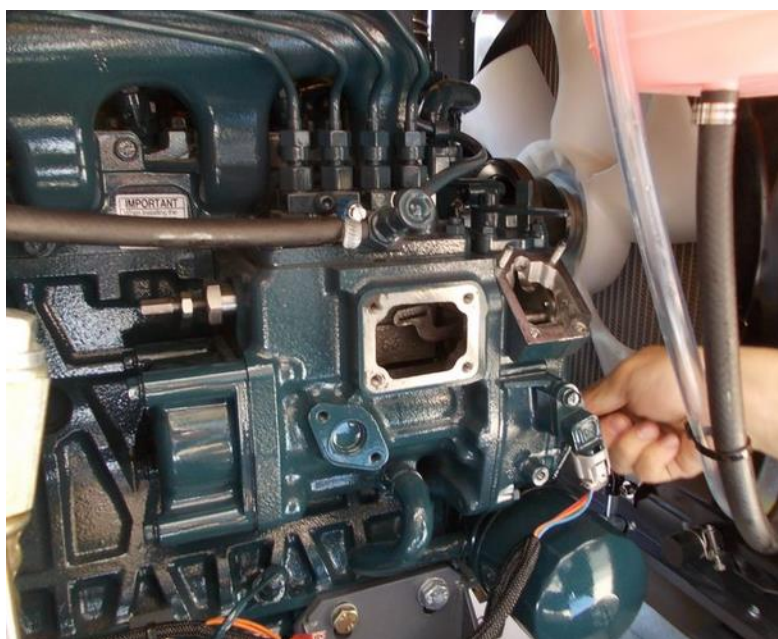


Figura 3.2 – MD Kubota M-Series

O MD funciona a velocidade constante, regulada pelo solenoide que faz por sua vez variar o curso do acelerador. A aceleração do motor está a cargo da variação da posição de uma régua mecânica que faz variar a admissão de combustível ao MD. Esta admissão de combustível é controlada pela posição do acelerador manual, que é composto por uma mola que faz abrir mais ou menos a admissão. A mola permite a dinâmica de aceleração e não impõe uma posição rígida na admissão, visto que no caso de uma mudança de uma velocidade para outra superior, o MD irá consumir mais combustível no transitório para depois estabilizar e manter a velocidade, sem fazer assim acelerar descontroladamente a máquina.

Desta forma, quando o GGD se encontra a funcionar a uma velocidade constante, o solenóide é um mecanismo fundamental para que a frequência se mantenha sempre a mesma aquando de

uma introdução ou deslastre de cargas. É nesta variação, que existe uma maior ou menor necessidade de combustível para manter um binário suficiente para as cargas impostas. O funcionamento deste controlo será abordado de um modo mais concreto no setor 3.1.3.

A cargo da proteção do MD, existem vários sensores que estão ligados à consola central, tais como o sensor de pressão e temperatura do óleo. Estes permitem a monitorização das condições físicas do MD, por parte da consola de parametrização do GGD que dá ordem de paragem do mesmo, assim que determinado parâmetro de controlo ultrapasse os limites admissíveis de funcionamento.

3.1.2 – Gerador elétrico

Acoplado ao veio do MD, está o gerador síncrono trifásico, da marca *Leroy Somer*, modelo *LSA 40.M5*, de excitação sem escovas. Na Figura 3.3, apresenta-se o gerador síncrono do GGD em estudo.



Figura 3.3 – Gerador Síncrono *Leroy Somer LSA 40.M5*

O gerador síncrono presente na Figura 3.3, possui 2 pares de pólos, o que faz com que o MD a funcionar a 1500rpm imponha à saída dos terminais do gerador a frequência de 50 Hz. O controlo da excitação é feito a cargo de um regulador automático de tensão, que variando a corrente de excitação faz com que a tensão de saída seja aproximadamente 400V entre fases,

tensão nominal da máquina. Verificou-se quando foi feita a variação de velocidade do GGD, que o regulador automático de tensão não conseguiria manter a tensão nominal de saída para velocidades da máquina motriz abaixo das 1500rpm, visto que neste tipo de excitação a tensão de alimentação para o circuito da excitatriz é feito a partir de um enrolamento de uma fase a 110V. Isto deve-se ao facto que a força eletromotriz é proporcional à velocidade a que o gerador é sujeito. O estator do gerador síncrono é composto por dois enrolamentos em cada fase, que possuem os seus terminais acessíveis. Na Figura 3.4, representa-se os enrolamentos das 3 fases do estator do gerador, em estrela, com os terminais acessíveis designados por T_k , em que $k \in [1;9]$.

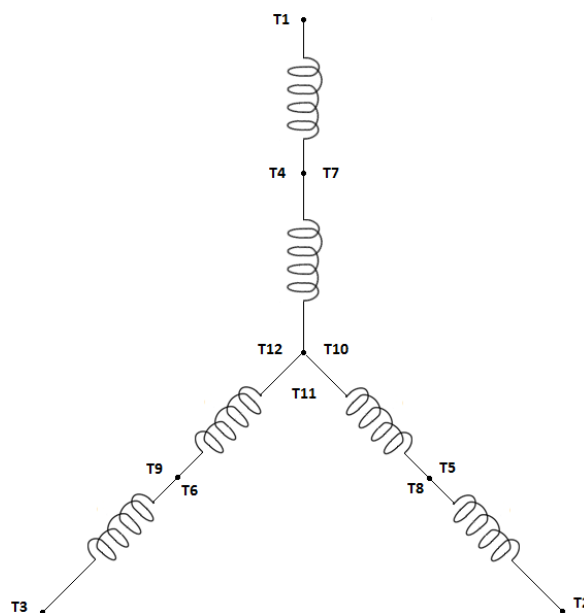


Figura 3.4 – Enrolamentos estatóricos ligados em estrela com terminais acessíveis do *Leroy Somer*, modelo *LSA 40.M5* presente no GGD

Para o conhecimento dos parâmetros elétricos desta máquina, foram realizados os ensaios de escorregamento, vazio e em curto-circuito. Estes ensaios foram feitos de acordo o guia de procedimentos, regulamentados pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), em, [41].

Entre os parâmetros elétricos obtidos salientam-se as componentes de reactância segundo os eixos direto e quadratura. Estas componentes de reactância por serem dependentes da frequência, e por conseguinte, da velocidade de acionamento, tornam-se relevantes para a construção do

mapa de eficiência do MD, uma vez que, a potência desenvolvida pelo MD é estimada a partir da potência eléctrica de saída do gerador síncrono.

O gerador síncrono presente no GGD é de pólos salientes, facto que foi possível confirmar a partir do ensaio de escorregamento realizado. O ensaio de escorregamento consiste em colocar o gerador a uma velocidade abaixo da de sincronismo e com o auxílio de um osciloscópio verifica-se a onda de tensão simples de saída do gerador síncrono, [41]. Neste ensaio impôs-se com o MD, uma velocidade abaixo das 1500rpm, para que fosse possível verificar uma tensão de saída variável. No caso dos geradores síncronos de pólos salientes verifica-se que quando estão sujeitos a baixas velocidades, ou seja, abaixo da velocidade síncrona a tensão simples aos terminais do estator possui oscilações ocorridas da variação da relutância no rotor.

Isto é, num gerador de pólos salientes existe um entreferro variável ao longo do rotor que faz com que a tensão aos terminais do estator não seja constante e apresente oscilações. Este efeito é cada vez mais visível à medida que a velocidade diminui e a notoriedade do entreferro existente entre polos é mais evidente.

Com este ensaio é possível retirar a reactância segundo o eixo em quadratura, já dos ensaios em vazio e em curto-circuito é igualmente possível retirar a reactância segundo o eixo direto.

Na Figura 3.5 é representado o resultado do ensaio de escorregamento realizado ao gerador síncrono.

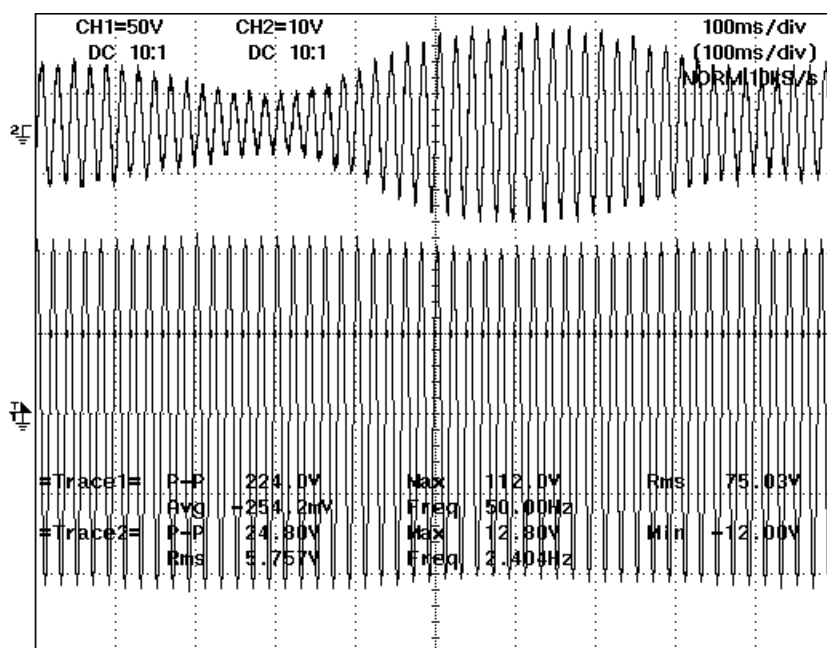


Figura 3.5 – Resultado do ensaio de escorregamento

A Figura 3.5 foi assim registada com auxílio a um osciloscópio de dois canais e duas pontas de prova, em que o canal 1 representa a tensão simples obtida aos terminais do estator do gerador síncrono, e o canal 2 representa a corrente de uma fase. A forma de onda de tensão representada no canal 1, permite confirmar que o gerador síncrono é de pólos salientes.

Tendo como base o guia de procedimentos de ensaios do IEEE, efectuou-se também o ensaio em vazio que consiste em retirar a curva de magnetização em circuito aberto, sem que exista qualquer carga eléctrica. Para tal coloca-se o gerador a uma velocidade constante, através do MD, e mede-se a a força electromotriz induzida entre os enrolamentos estatóricos em função da corrente de excitação. A velocidade do ensaio é traduzida pela leitura da velocidade do MD ou pela frequência do gerador.

Para se ajustar a corrente de excitação, na realização do ensaio em vazio, foi desligado o AVR e utilizou-se um circuito de excitação de tensão média variável, constituído por uma bateria de 12V e um conversor DC-DC de um quadrante.

Para a curva de magnetização, foram então realizadas 6 medições até uma tensão de saída de 60% da tensão nominal, sendo uma com excitação nula. Entre o intervalo de 60% a 110% da tensão nominal foram obtidos 10 pontos de medida e por fim retiraram-se mais 3 pontos de medida entre os 110% e os 120% da tensão nominal.

Pode-se observar o resultado final na Figura 3.6:

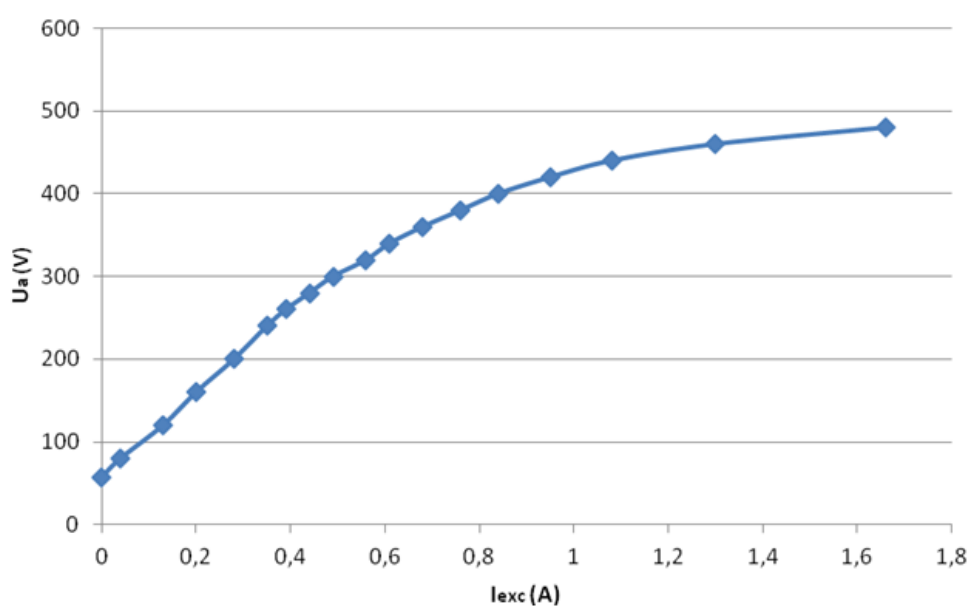


Figura 3.6 – Ensaio em vazio

Da curva obtida, verifica-se que com corrente de excitação igual a zero existe tensão aos terminais da armadura do alternador. Este facto deve-se ao magnetismo remanescente que existe na máquina. Constatou-se, que este magnetismo remanescente reduz-se ao longo tempo e também é influenciado pelas condições climáticas, contudo este ponto não é estudado neste trabalho. O ensaio foi iniciado já com um prévio funcionamento do gerador e logo após o desligar do AVR.

O ensaio em curto-circuito, consiste em curto-circuitar os terminais de saída do alternador, elevar o gerador à velocidade de 1500rpm, variar a corrente de excitação para obter valores de corrente de armadura de 125%, 100%, 75%, 50% e 25% do seu valor nominal. Variou-se então a corrente de excitação e realizaram-se leituras da corrente de armadura. O resultado obtido é o apresentado na Figura 3.7:

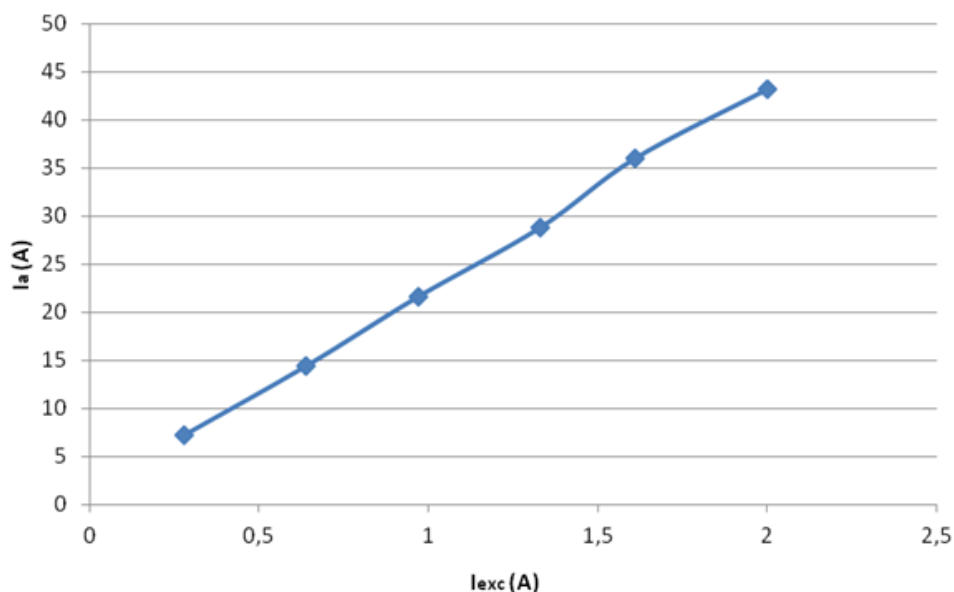


Figura 3.7 - Ensaio em curto-circuito

Após a realização dos ensaios ao gerador síncrono, é possível caracterizá-lo quanto às reactâncias segundo o eixo direto e em quadratura. O cálculo das mesmas é realizado no setor 3.2.3 para a determinação do mapa de eficiência do MD, com intuito de obter a potência produzida pelo mesmo.

3.1.3 - Controladores de tensão e frequência do grupo Diesel

Para o controlo do funcionamento do GGD distinguem-se dois tipos de controlo, nomeadamente o controlo de frequência e de tensão, que tal como apresentado no sector 2.3, permitem que sejam mantidas determinadas características de tensão de alimentação para as cargas eléctricas, mas também que sejam garantidas as condições para o bom funcionamento mecânico do conjunto MD mais GE.

O sistema de controlo de frequência do GGD pode ser descrito conforme o diagrama de blocos da Figura 3.8, onde para o presente fim não importa detalhar quais são as grandezas envolvidas nas entradas e saídas dos blocos apresentados.

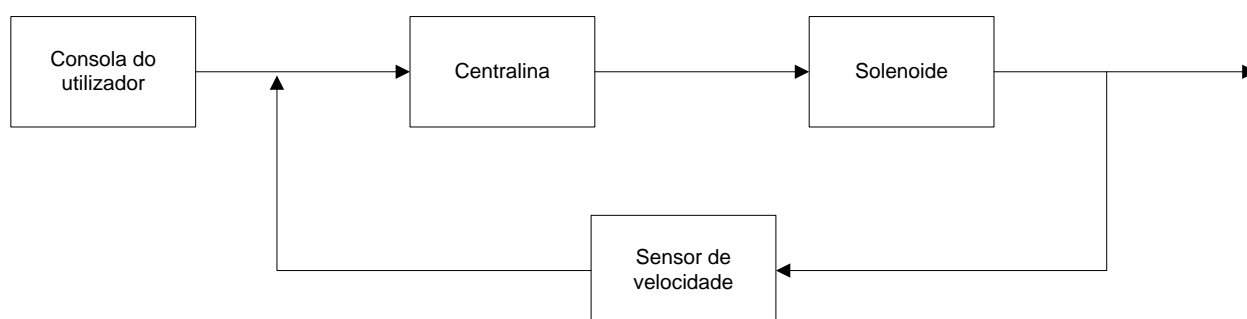


Figura 3.8 - Processo referente ao controlo de velocidade do grupo gerador

O sistema é assim composto pela centralina que recebe dados da consola de comando que permite a interface com o utilizador, e que determina os intervalos admissíveis para a variação de tensão e frequência, se deve ou não existir ordem de paragem aquando de variações nas condições normais de funcionamento. Também parte integrante do sistema de controlo é o solenoide, que funciona como o último passo na resposta do sistema para uma variação de velocidade. Este possui um curso cuja posição do mesmo é variável consoante o valor médio da tensão de alimentação, o que permite através da centralina regular a admissão de forma automática. A tensão de alimentação possui amplitude máxima de 12V, que corresponde à admissão máxima de combustível permitida. O sistema de controlo completa-se com a existência um sensor de velocidade que permite a leitura da mesma no MD fazendo assim a retroação do sistema, permitindo por sua vez o ajuste em tempo real da posição do solenoide que controla a admissão e consequentemente a velocidade. Este processo é apresentado no diagrama de blocos da Figura 3.8.

Na situação de arranque do GGD, o solenoide é alimentado à tensão nominal para que tenha o curso na posição mínima, ou seja, na situação de máxima admissão de combustível.

Nesta posição, a máxima admissão de combustível é apenas limitada pela posição do acelerador manual. O acelerador define a admissão de combustível para que o motor atinja a velocidade desejada. Este acelerador só tem influência direta no aumento de velocidade se a atuação do solenoide for inibida, caso contrário a regulação da velocidade por exemplo para mercados onde a frequência seja de 60Hz, a alteração ter de ser ao nível da centralina e da posição do acelerador manual. Na Figura 3.8, está presente o acelerador manual do MD.



Figura 3.8 – Acelerador manual do MD

Quando o solenoide não se encontra alimentado possui o curso na sua posição máxima, que permite o corte da admissão de combustível que por sua vez faz o MD parar. Existindo ordem de paragem, a alimentação do solenoide é nula e este corta a alimentação. Manualmente, a paragem também é possível através da atuação da alavanca presente junto ao solenoide, onde exerce a mesma função que este aquando da situação de paragem. Na Figura 3.9, está presente a alavanca de paragem manual do MD.

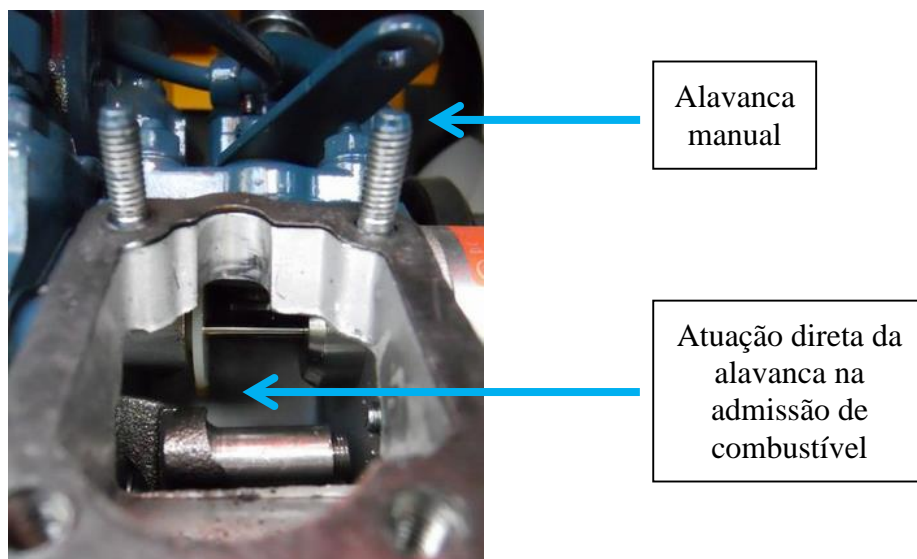


Figura 3.9 – Alavanca de paragem manual

Para o controlo de tensão, o AVR é parte integrante desta solução, onde permite que a tensão composta de saída seja de aproximadamente 400V. O controlo é feito tendo por base a velocidade do alternador e a medida de tensão de saída, que faz com que a excitação seja adaptada consoante os valores obtidos. Isto verifica-se, que abaixo dos 45Hz a excitação não é suficiente para manter a saída de tensão a 400V. Tal situação, deve-se ao facto de a velocidade do gerador síncrono não ser suficiente para produzir um campo elétrico na excitatriz, para que seja criada a tensão nominal aos terminais da máquina. Na Figura 3.10, encontra-se o AVR *Leroy Somer R220* presente no gerador síncrono do GGD e que é responsável pelo controlo de tensão.

Na Figura 3.10a), encontra-se o esquema do circuito de excitação com o AVR presente no GGD. Este AVR permite o ajuste da tensão de referência, com a opção de regulação local ou remota, permite também através do estabilizador, a regulação do tempo de resposta do AVR às variações de tensão ocorrentes aos terminais do estator. O AVR possui a alimentação até 110V a partir de um enrolamento do estator, alimentação esta, que o regulador compara com a referência pretendida, e que coloca por sua vez aos terminais do indutor a corrente de excitação rectificada necessária.

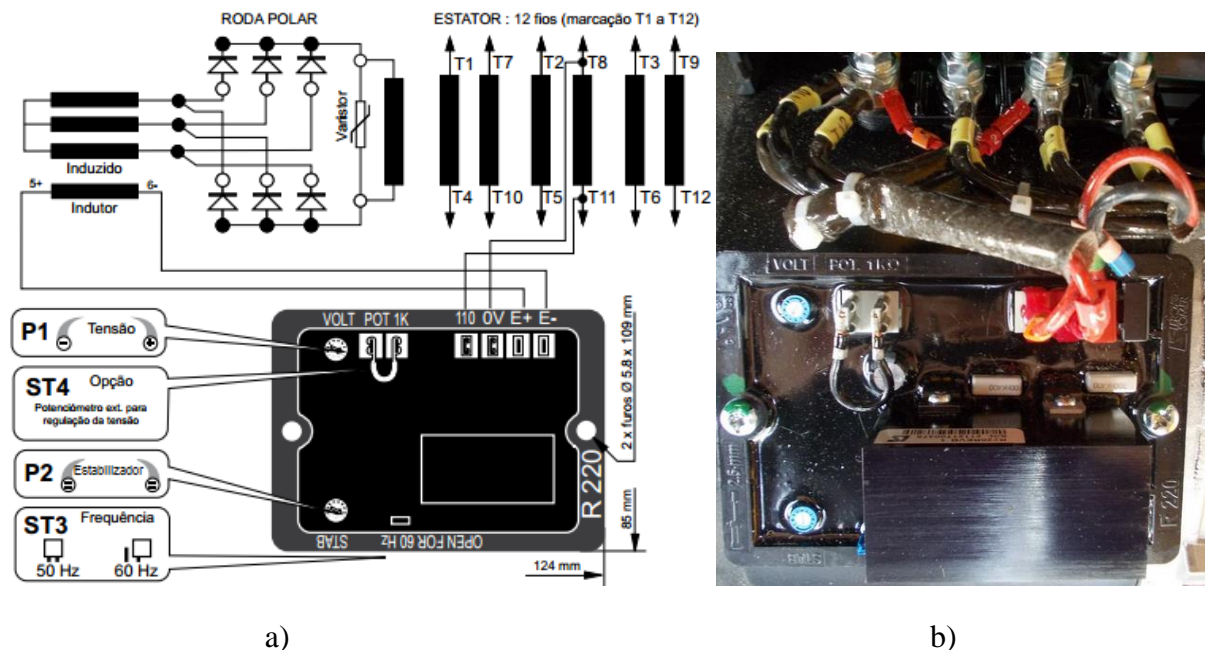


Figura 3.10 – a) AVR Leroy Somer R220 usado no gerador síncrono do GGD, (extraído de [42]); b) AVR Leroy Somer R220 presente no GGD

3.1.4 - Regulação de velocidade do grupo Diesel

Tal como como descrito no sector 3.1.3, a regulação de velocidade no GGD está a cargo do conjunto composto pela centralina, solenoide e retroação de velocidade. A retroação é feita pelo sensor de velocidade, permitindo que a velocidade se mantenha num valor constante definido pela posição do acelerador manual, e pela definição dada ao GGD consoante a frequência, isto é, a frequência ou é 50Hz ou 60Hz, dependendo seu utilizador. No entanto para se concretizar o objectivo da emulação do sistema é necessário inibir o controlo automático de velocidade existente.

O conjunto do solenoide e acelerador manual, permitem variar a posição de uma régua interior ao MD que permite o ajuste da admissão de combustível. A esta régua está ligado o componente que estabelece o ralenti da máquina. O ralenti, caracteriza-se como sendo a velocidade de funcionamento em vazio do motor, definida pelo fabricante. A régua possui também a interação com o solenoide e acelerador manual. Na Figura 3.11, é apresentada a régua com os componentes que nela atuam diretamente.

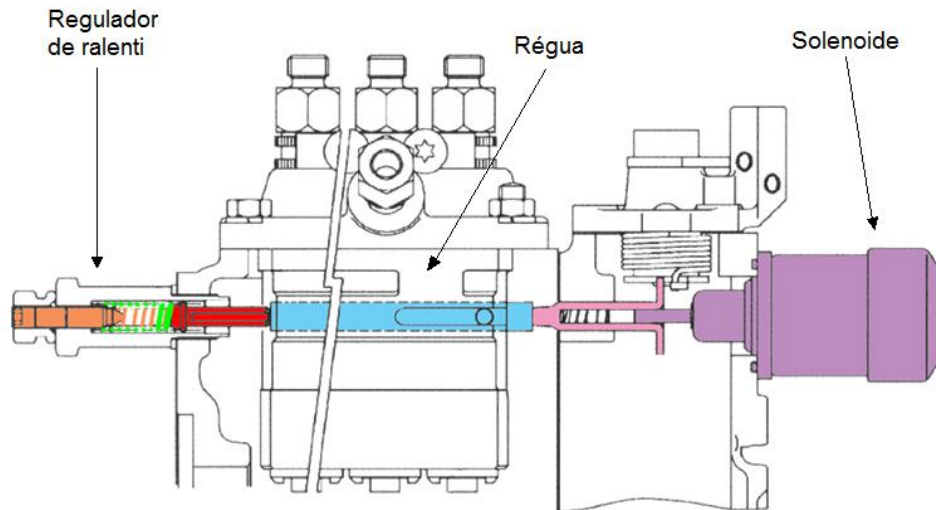


Figura 3.11 - Componentes associados à régua de admissão

Na Figura 3.12, está presente a representação real do conjunto descrito da régua de admissão do MD, que foi alvo de estudo neste trabalho.



Figura 3.12 – Conjunto composto pelo regulador de ralenti, régua e solenoide no MD em estudo

O ajuste da admissão de combustível é dinâmico e para tal, tanto o solenoide como o acelerador possuem na sua morfologia elasticidade de movimentos que permite com que a dinâmica seja possível.

A elasticidade referida é à custa de uma mola no acelerador manual e no solenoide, que torna os cursos impostos pelos mesmos flexíveis, permitindo desta forma a dinâmica na admissão de combustível. A dinâmica ocorre em momentos de aceleração e desaceleração, nas situações de arranque, paragem, funcionamento em vazio e em carga. Em funcionamento, a dinâmica é essencialmente devida a alterações da carga acoplada, onde para manter a velocidade e fornecer o binário suficiente é necessário uma variação do combustível injetado. Numa situação de aumento de velocidade, a máquina necessita de aceleração até novamente estabilizar e no caso de não existir dinâmica e se se for imposta uma posição rígida na régua da admissão, não existe um cessar da aceleração dado que a admissão de combustível não estabiliza. Isto resulta num acréscimo de velocidade elevado, onde a máquina tende a embalar podendo ocorrer danos daí resultantes nos componentes do MD. Tal facto foi comprovado com a alteração do regulador de ralenti, por uma peça fixa presente na Figura 3.13.



Figura 3.13 – Peça de regulação de ralenti

Na Figura 3.13, estão presentes as peças de regulação de ralenti, com a peça original com elasticidade em baixo e a peça fixa em cima.

Os componentes aqui descritos como o solenoide, centralina e retroação de velocidade são essenciais para que o GGD funcione a uma velocidade constante, e para que as oscilações sejam reduzidas e que este funcione sem problemas. Contudo, para a concretização desta dissertação a variação de velocidade é fundamental.

A variação de velocidade é necessária para que seja retirado o comportamento da máquina nos diversos regimes de funcionamento do GGD com cargas variáveis. A análise do comportamento deve incluir as cargas admissíveis em cada velocidade, o consumo de combustível e o binário máximo para cada velocidade.

O controlo externo da velocidade do GGD, pode ser feito a partir da atuação ao nível do solenoide, da retroação e da centralina, conjugados com a atuação no acelerador manual. No entanto das soluções existentes, a que comportava menos intervenção e menos tempo investido, seria inibir a atuação do solenoide, tendo-se assim optado pela remoção do mesmo para que de forma alguma pudesse influenciar a velocidade do MD. Com a remoção do solenoide, deixa de haver controlo automático de velocidade a partir da máquina e passa a ser possível a variação de velocidade pela atuação direta no acelerador manual. Esta atuação, permite igualmente uma variação direta da posição da régua e consequentemente da admissão de combustível traduzindo-se por último no aumento ou redução da velocidade. A velocidade máxima do MD possui diversos limitadores físicos, como é o caso de alguns batentes que impedem o percurso máximo do acelerador. Os batentes foram assim, alvo de ajuste para que se atinja os valores de velocidade máxima desejados e se consiga obter os valores necessários à construção de um mapa de eficiência. Além dos batentes, constatou-se que é possível aumentar a velocidade se fosse implementada uma mola do acelerador com um coeficiente de elasticidade superior, para que com o mesmo espaço se consiga movimentar com maior liberdade a régua de admissão. Desta forma, a variação de velocidade é conseguida manualmente com o acelerador, sem que exista nenhum dispositivo que impeça a que velocidade se altere.

Com o ajuste dos batentes interiores, conseguem-se atingir velocidades numa gama entre as 900rpm e as 2580rpm, sendo que para velocidades abaixo dos 900rpm o MD já se torna instável, apresentando oscilações de velocidade e elevadas vibrações, optando-se desta forma por não considerar para efeitos de funcionamento estas velocidades. Na Figura 3.14, é apresentado o batente interno que limita a posição do acelerador, consequentemente da régua e dessa forma a admissão de combustível.

As velocidades acima dos 2580rpm são possíveis, mas não com os recursos que a máquina disponibiliza, razão para tal que não foram consideradas.

Primeiramente, antes da solução encontrada com a remoção do solenoide foram experimentadas outras vias para a resolução do problema. Numa opção, considerou-se a atuação na retroação do sistema, dado esta ser feita através da leitura da velocidade no motor. Assim, se fosse replicado um sinal na retroação referente a uma velocidade inferior à realmente verificada, a centralina daria ordem ao solenoide para abrir mais a régua e a velocidade iria aumentar. No entanto, esta solução não é prática e levanta questões como o erro causado e também de controlo, na medida em que para variações de carga, o sinal teria de ser adaptativo.

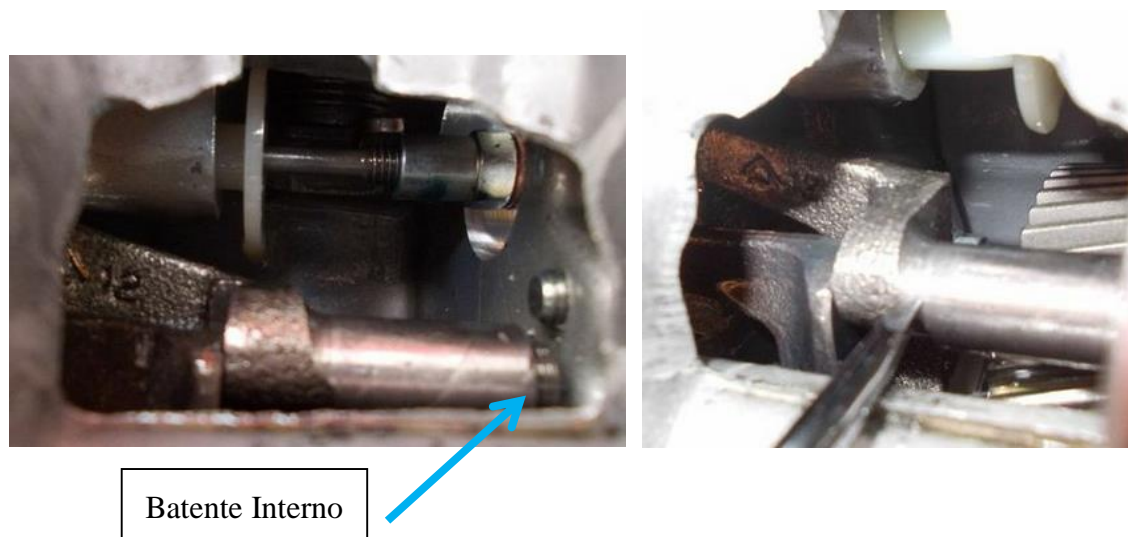


Figura 3.14 – Batente interno do acelerador

Outra opção considerada, seria a alteração da centralina, contudo igualmente com a anterior não foi considerada prática e breve, sendo assim, a solução escolhida passou pela remoção do solenoide, que é o dispositivo que executa as ordens dadas pela centralina e pelo utilizador.

Retirado o solenoide, este para além de responsável pela variação da admissão e controlo de velocidade é também responsável pela paragem da máquina. Como este já não se encontra presente a paragem passa igualmente como a variação de velocidade a ser manual, sendo feito através de uma alavanca que permite o fecho da régua de admissão para que assim exista um corte na alimentação de combustível, fazendo assim o MD parar.

3.2 – Mapa de eficiência do motor Diesel

Conseguida a variação da velocidade do GGD procede-se então à obtenção do mapa de eficiência do MD. Um mapa de eficiência, consiste como já referido no setor 2.5, num mapa a partir do qual se caracteriza um motor ao nível dos seus consumos específicos, a diferentes velocidades e diferentes potências ou binários produzidos. O consumo específico neste tipo de representação é feito através de curvas de nível que identificam o consumo específico de combustível a determinada potência, binário e velocidade do motor.

Para se conseguir construir este mapa, foi necessário o registo de diversas variáveis, como a tensão aos terminais da carga acoplada, correntes de cada fase, velocidade e consumo de combustível.

As cargas aplicadas ao grupo gerador foram colocadas a partir da tomada trifásica de 32A com proteção a montante e a jusante de um cabo prolongador, e foram conseguidas com auxílio a bancos de resistências ajustáveis por escalões, de 2A e de 5A. Consoante a velocidade a que o grupo é sujeito, a tensão de saída é variável sendo necessários mais ou menos escalões para conseguir a mesma potência.

O GGD possui duas tomadas trifásicas, de 16A e 32A possuindo também um barramento acessível a partir do qual é possível acoplar carga elétrica.

3.2.1 - Determinação da curva de binário máximo

Na primeira fase, para a obtenção do mapa de eficiência foram realizados os ensaios para determinar o binário máximo que a máquina fornece a diferentes velocidades dentro da sua gama de funcionamento. Destes ensaios retira-se a curva de binário máximo que será inserida no mapa de eficiência. O objetivo da obtenção desta curva, é o de delimitar a zona até onde o GGD consegue funcionar.

Para a obtenção desta curva, foram delineados os moldes a partir dos quais esta seria obtida, nomeadamente os valores de velocidade a que se iriam realizar os ensaios. Posto isto, considerou-se como uma boa amostragem, os ensaios a realizar às seguintes velocidades de funcionamento, apresentadas na Tabela 3.1, que correspondem a incrementos de 5Hz na tensão de saída do GGD.

Tabela 3.1 – Velocidades de ensaio

| Velocidade (rpm) | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 900 | 1050 | 1200 | 1350 | 1500 | 1650 | 1800 | 1950 | 2100 | 2250 | 2400 | 2550 |

Partindo de cada valor de velocidade acima estipulado, foram realizados os ensaios para determinação do binário máximo. Estes consistem em fixar a velocidade do MD, em cada

escalão definido na Tabela 3.1, através do acelerador manual. Estando esta velocidade fixa e constante, procede-se à aplicação de escalões de carga. À medida que os escalões de carga vão sendo introduzidos, como o controlo automático de velocidade se encontra inibido, a velocidade tende a diminuir, sendo necessário proceder a um constante ajuste da mesma através do acelerador. Esta diminuição de velocidade deve-se ao aumento do binário de carga sobre o MD e que com o caudal de combustível que é admitido ao MD, este não é suficiente para exercer o binário necessário para satisfazer a carga à velocidade desejada.

Assim, atuando no acelerador manual, o que existe é um aumento de combustível injetado no MD, que permite assim ter binário suficiente para entregar à carga na velocidade desejada. À medida que a carga aumenta, é então necessária uma maior injeção de combustível para que se possa manter a velocidade pretendida, mas também, o binário suficiente para conseguir satisfazer a carga a velocidade constante. Este procedimento manual, em condições de funcionamento normal do GGD, a 50Hz ou a 60Hz, está a cargo do solenoide e de todo o conjunto do controlo automático de velocidade.

Com o aumento de carga e com os consecutivos ajustes no acelerador para se manter a velocidade, o MD atinge um valor máximo de carga que consegue suportar à velocidade a que é realizado o ensaio. Este máximo atingido, é definido como sendo o binário máximo que o MD consegue fornecer à carga a uma velocidade fixa, sem existir decaimento da mesma e sem existir instabilidade no funcionamento do MD. O binário máximo do MD é assim atingido a uma velocidade constante, em que o motor não consegue admitir mais carga por mais combustível injetado sem que tenha oscilações no seu funcionamento, nomeadamente de velocidade. A característica de binário máximo fornecido por um motor não é linear e varia com a velocidade, razão para a qual são realizados os ensaios numa vasta gama de velocidades no intervalo onde se rege o funcionamento deste motor.

Numa primeira análise, considerou-se que o binário máximo para velocidades baixas é inferior ao binário suportado para velocidades superiores, sendo este crescente até novamente voltar a diminuir para velocidades mais elevadas. Desta forma, no primeiro ensaio realizado para 900rpm, os escalões de carga foram adicionados do zero, para que fosse acompanhada a evolução da resposta do MD. Em cada passo foram retirados registos das correntes, tensões e potências envolvidas, que para além de servirem para se tomar conhecimento das grandezas em causa, tinham como objetivo o de calcular o binário máximo. Desta forma, atingido o binário máximo aos 900rpm, foram registadas os valores das grandezas a que este ocorre para assim

desta forma no ensaio à velocidade de 1050rpm se considerar como escalão base, o escalão máximo atingido na velocidade anterior de 900rpm. Assumiu-se assim, que o binário máximo disponível às 1050rpm seria superior ao anterior para a velocidade de 900rpm.

Tal facto verificou-se, constatando-se que o MD para o escalão de velocidade superior, suporta mais escalões de carga.

Na realização destes ensaios, teve-se em consideração algumas condições externas em que foram feitos, dado estas influenciarem o comportamento na máquina. Sendo assim, foi tido em consideração a realização dos ensaios na mesma altura do dia e com condições de ventilação reforçada através de ventiladores auxiliares, tanto nas cargas como no GGD.

Além deste cuidado não foram tidos em conta outros fatores que possam ter influenciado o funcionamento da máquina, como a pressão atmosférica e humidade do ar.

Um exemplo da afetação do sistema às condições de temperatura, é o do gerador síncrono, em que estas limitam a corrente admissível do mesmo, influenciando assim tanto a curva de binário máximo como o mapa de eficiência construído. O gerador síncrono, possui na sua chapa de características dois limites de corrente para dois valores de temperatura do ar distintos. Estes valores estão representados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Corrente admissível do gerador síncrono em função da temperatura

| Temperatura (°C) | Corrente (A) |
|-----------------------------|-------------------------|
| 40 | 28 |
| 27 | 36 |

Com estes valores foi assumida, dadas as circunstâncias de ensaio serem no Verão, uma temperatura ambiente acima dos 27°C e abaixo dos 40°C. Posto isto, os ensaios foram feitos com esta base pois caso contrário o alternador poderia estar sujeito a danos pelas elevadas correntes que nele circulam, associados a uma baixa capacidade de dissipação do calor. Desta forma, foram feitos os ensaios sob as condições de temperatura referidas, de onde se obtiveram os registos das potências correspondentes ao valor máximo de corrente admissível.

No entanto nos primeiros ensaios este valor de corrente não foi atingido, visto que o binário máximo era atingido para valores de correntes e potência abaixo da nominal, não ocorrendo limitações ao nível da corrente pedida ao gerador síncrono. Este facto apenas se verificou até ao ensaio à velocidade de 1200rpm, em que o MD atinge o seu binário máximo a valores de corrente abaixo do admitido como máximo que o gerador síncrono pode atingir sem possíveis danos.

Para as velocidades acima, verificou-se no decorrer dos ensaios que o binário máximo produzido pelo MD não era atingido com os aumentos dos escalões de carga, sendo este limitado pela corrente admissível do gerador síncrono. Tal facto, verificou-se até ao fim dos ensaios para as restantes velocidades, ficando assim a curva de binário máximo limitada pela corrente que o gerador síncrono suporta e não pelo que o MD consegue fornecer. A curva de binário máximo fica assim descrita como a curva referente do GGD, MD mais gerador síncrono e não apenas do MD.

Com isto, a curva de binário máximo toma uma zona praticamente linear em que o MD possui mais binário disponível para escalões de potência superiores, contudo a limitação ocorre devido ao gerador síncrono, que não suporta mais corrente para fornecer à carga, levando a que o binário máximo representado não seja o binário máximo do MD. Na Figura 3.15, encontra-se representada, a curva de binário máximo do GGD.

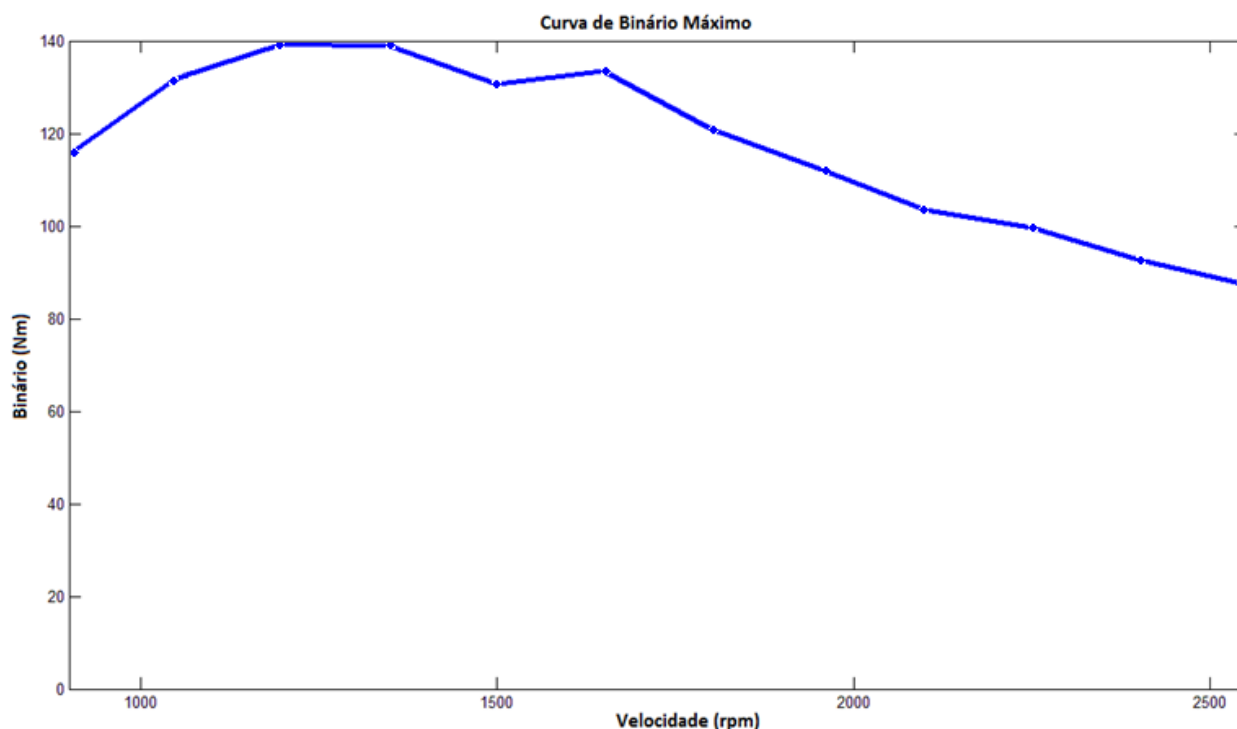


Figura 3.15 – Curva de binário máximo do GGD

A curva representada na Figura 3.15, foi obtida através do Matlab® R2009b. Com esta curva estão identificados os limites de funcionamento do GGD, onde se rege o funcionamento do mesmo e até onde este pode ir no fornecimento de potência em cada velocidade. O binário máximo apresentado na curva da Figura 3.15, é calculado a partir de (3.1).

$$T_{m\acute{a}x} \cong \frac{P_u}{n \times \frac{2\pi}{60}} \quad (3.1)$$

Em (3.1), o binário máximo desenvolvido, $T_{m\acute{a}x}$, é obtido através da potência útil, P_u , medida e calculada aos terminais da carga eléctrica colocada, onde n se refere à velocidade do GE e MD em rpm. Contudo como o binário sendo uma grandeza mecânica não pode derivar directamente de uma grandeza eléctrica, daí o facto de ser considerado o binário máximo como uma aproximação retirada a partir da grandeza eléctrica. Para o cálculo do binário máximo desenvolvido pelo MD foram consideradas as perdas eléctricas do gerador, que são descritas no sector 3.2.3.

Desta forma, conhecidos os regimes máximos de funcionamento do grupo, pode-se proceder à construção do mapa de eficiência que ditará os comportamentos do MD até aos valores que compõem a curva de binário máximo aplicada ao mesmo.

3.2.2 – Ensaio do grupo gerador Diesel com velocidade e cargas variáveis

Retirada a curva de binário máximo do GGD, procederam-se aos ensaios para retirar o comportamento do grupo nos diversos regimes de funcionamento com cargas variáveis. Isto é, com diversos escalões de carga e de velocidade aplicados para que desta forma seja conhecido o comportamento do GGD no consumo específico de combustível até à potência máxima, caracterizada e limitada pela curva de binário máximo.

Para a obtenção do mapa de eficiência além dos registos de correntes e potências que foram feitos nos ensaios descritos no setor 3.2.1, é necessário proceder ao registo dos valores de consumo de combustível. Os valores de consumo de combustível, complementam o mapa de eficiência a fim de indicar para cada valor de potência e velocidade o consumo específico de combustível.

A fim de se obterem os consumos foram estudadas duas hipóteses, a aquisição e aplicação de um caudalímetro diferencial associado a um contador para que os consumos possam ser medidos ou através do uso de uma balança de precisão para medir a massa de combustível consumido.

Relativamente à primeira hipótese, foi feita uma pequena investigação no mercado de caudalímetros e foram estabelecidos contactos com algumas empresas, onde dos caudalímetros diferenciais que eram postos à disposição, estes eram inadequados porque para leituras corretas dos mesmos exigia-se um caudal mínimo de combustível superior ao consumo máximo dado pelo fabricante do GGD.

Desta forma, tornou-se impraticável a solução do uso de um caudalímetro diferencial, no entanto com os contactos realizados foi dada a sugestão para o uso de dois caudalímetros, em que cada um faria uma leitura independente na tubagem da admissão e do retorno do motor, fazendo-se um tratamento aos dados de saída para que fosse obtida uma leitura diferencial. Esta solução embora praticável implicaria um longo tempo para que todo o sistema ficasse operacional, sendo assim, optou-se por outro tipo de solução em que se conseguisse atingir o mesmo fim, o do registo da massa de combustível consumida a partir de um recipiente.

Optou-se então, por se realizar as medições com auxílio a uma balança de precisão digital. A balança digital utilizada para o efeito possui precisão até a grama, admitindo-se o suficiente para efeitos da medição do consumo. Assim, tendo a balança recorreu-se a um recipiente com capacidade até 5l que faria de depósito de combustível, a partir do qual o MD faria a admissão de combustível mas também para onde enviaria o retorno do mesmo que não é queimado.

O princípio de funcionamento desta solução baseia-se no seguinte, o recipiente que agora funciona como depósito contém uma determinada massa de combustível. Este recipiente de combustível é então colocado na balança, ambos sustentados numa base nivelada, estável, imune a vibrações e influências externas que se consideram de relevo que influenciem as medições, como o vento e vibrações diretas do GGD.

Colocado o recipiente na balança, introduzem-se as tubagens no recipiente de onde será feita a admissão através da bomba de combustível e as responsáveis pelo retorno do mesmo. Desta forma a balança irá medir toda a massa correspondente das tubagens, recipiente e combustível nele inserido, onde assim a diminuição da massa do conjunto corresponde ao combustível que é na realidade consumido. Na Figura 3.16, encontra-se a solução utilizada para o registo do consumo de combustível.



Figura 3.16 – Balança e recipiente de combustível

Com o uso da balança obtêm-se diretamente o consumo em gramas do que foi consumido pelo MD e dado que o mesmo possui sempre retorno de combustível, a medida resultante da diminuição da massa equivale ao que realmente o MD consumiu num dado instante de tempo.

Tendo a base para a realização dos ensaios, foi necessário assumir um intervalo de tempo para o qual se obtém a amostra que ditará o consumo em quilogramas por quilowatt-hora, e assim considerou-se que um ensaio de 3 minutos para efetuar cada registo seria o suficiente para se fazer a extrapolação para uma hora. Este registo de três minutos de funcionamento, recorrendo a um cronómetro digital, é feito em regime permanente sem que haja alterações na velocidade e na carga acoplada.

Para esta contagem, recorreu-se a um cronómetro digital para que fosse o mais preciso possível a contagem do tempo e assim a variação entre ensaios fosse a mais baixa possível.

A realização dos ensaios foi feita tendo por base os mesmo intervalos de velocidade utilizados nos ensaios para determinação da curva de binário máximo, que são apresentados na Tabela 3.1. Desta forma realizaram-se os ensaios para diversos regimes de funcionamento em cada velocidade, isto é, em cada velocidade foi feito o registo do consumo de combustível em vazio e em diversos escalões de carga até à máxima carga suportada, valor este que foi determinado nos ensaios da curva de binário máximo.

Para cada velocidade, foram realizados entre 10 a 15 registos, onde incluem além do funcionamento em vazio, diferentes escalões de carga. Efetuaram-se assim, com base nos 3

minutos de consumo em cada regime de funcionamento, os registos da massa no início do tempo e os registos da massa ao fim dos 3 minutos. Fazendo-se a diferença entre massas, obtém-se a massa do combustível consumido.

Com os valores de tensão simples e correntes de cada fase medidos, calculou-se a potência ativa útil, P_u , que o GGD produz em cada situação a partir da equação (3.2), com carga puramente resistiva e por conseguinte, fator de potência por fase unitário.

$$P_u = V_s(I_1 + I_2 + I_3) \quad (3.2)$$

Em (3.2) V_s representa a tensão simples, igual a em todas as fases, e I_1 , I_2 e I_3 correspondem às correntes nas fases 1, 2 e 3, respetivamente.

O consumo total de combustível, registado à medida que se aumenta a carga aplicada ao MD por intermédio do gerador síncrono é superior. Embora isto se verifique, este aumento de consumo não se traduz em maiores perdas para o consumidor, na medida em que o consumo embora se verifique superior, este por quilowatt-hora produzido é inferior quando comparado a um consumo que inferior, produz menos quilowatt-hora. Este facto equivale ao consumo específico de combustível.

O consumo específico é representado em gramas de combustível consumido por quilowatt-hora (g/kWh).

Na Tabela 3.3, são apresentados os resultados dos ensaios para a velocidade de 1500rpm, onde se encontram presentes os dados de velocidade, consumo de combustível para os 3 minutos de cada ensaio, corrente, potência calculada e por fim o consumo específico de combustível do GGD sem o cálculo das perdas do gerador síncrono. Em anexo na Tabela I.1, encontram-se os resultados obtidos para todos os escalões de velocidade ensaiados.

Tabela 3.3 – Resultado do ensaio realizado para a velocidade de 1500rpm

| Velocidade (rpm) | Consumo (g) | I1 (A) | I2 (A) | I3 (A) | Potência calculada (kW) | Consumo Específico (g/kWh) |
|------------------|-------------|--------|--------|--------|-------------------------|----------------------------|
| 1500 | 67 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 77 | 1,84 | 1,82 | 1,89 | 1,28 | 1201,20 |
| | 96 | 3,60 | 3,77 | 3,78 | 2,58 | 745,44 |
| | 117 | 8,10 | 8,25 | 8,18 | 5,67 | 412,96 |
| | 140 | 11,75 | 11,90 | 11,90 | 8,21 | 340,96 |
| | 171 | 16,24 | 16,36 | 16,10 | 11,20 | 305,33 |
| | 190 | 18,07 | 18,21 | 17,87 | 12,46 | 305,11 |
| | 222 | 22,47 | 22,72 | 22,37 | 15,54 | 285,74 |
| | 251 | 25,87 | 26,16 | 25,89 | 17,85 | 281,33 |
| | 311 | 30,18 | 30,61 | 29,97 | 20,69 | 300,58 |

O consumo em gramas, apresentado na Tabela 3.3, é a diferença de massas retirado a partir dos registos efetuados no início e no fim de cada ensaio de 3 minutos.

Verifica-se nos valores registados, também patente na Tabela 3.3, que de facto existe um consumo superior à medida que se aumenta a carga acoplada ao gerador síncrono, isto deve-se ao facto de, com um aumento de carga é necessário aumentar a admissão de combustível, para que o MD consiga manter a velocidade e possua binário suficiente para satisfazer a carga. Através de uma breve análise, é possível confirmar que o consumo específico de combustível é decrescente à medida que a potência gerada é superior. Tal indica que para baixas potências, embora o consumo seja inferior em relação a potências superiores, quando este comparado com o consumo específico a situação inverte-se, na medida em que para baixas potências o consumo específico é superior em relação a potências superiores.

De salientar que a potência calculada, refere-se à potência à saída do GGD, não contemplando as perdas do gerador síncrono. Assim, o consumo específico apresentado na Tabela 3.3 diz respeito ao GGD e não do MD. No setor 3.2.3, para a construção do mapa de eficiência será calculada a potência desenvolvida pelo MD a partir da determinação das perdas do gerador síncrono. Assim sendo, o consumo específico utilizado no mapa de eficiência, será referente ao MD.

3.2.3 – Determinação do mapa de eficiência do motor Diesel

Após a realização dos ensaios para a obtenção da curva de binário máximo, dos valores de potência, velocidade e consumo de combustível é possível representar o mapa de eficiência. Contudo a potência medida não traduz na realidade a potência produzida pelo MD, dado que existem perdas associadas. Neste caso, é então necessário obter os valores de reactâncias e resistências de enrolamentos do gerador síncrono, parâmetros importantes, dado variarem com a velocidade. Dado o GE tratar-se de uma máquina síncrona de pólos salientes, facto comprovado nos ensaios de escorregamento realizados, foram realizadas medições para a obtenção das reactâncias segundo o eixo direto e em quadratura.

A partir da medição direta nos enrolamentos estatóricos da indutância segundo eixo direto, L_d , com um medidor de impedâncias RLC, retira-se a reactância segundo o eixo direto, X_d , a uma determinada frequência. A frequência, f , utilizada para a obtenção deste parâmetro foi de 1kHz, que através de (3.3) retira-se que:

$$X_d = 2\pi fL_d \quad (3.3)$$

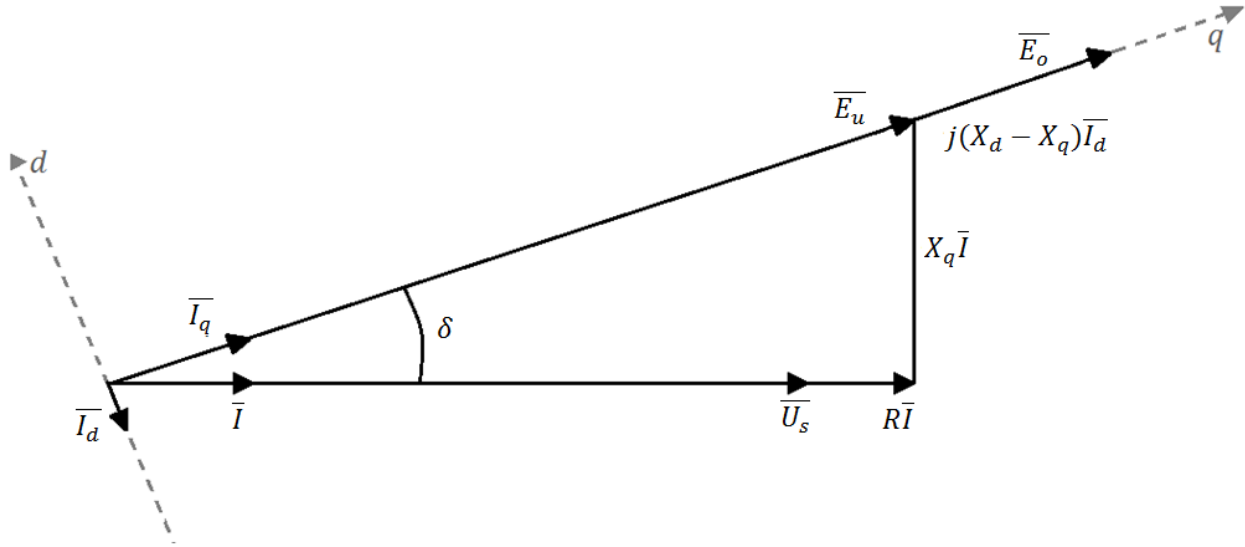
Do ensaio de escorregamento obtêm-se a reactância segundo o eixo em quadratura, quando a tensão simples é mínima e corrente é máxima. Em (3.4) retiram-se os valores referentes à zona de saturação, segundo o guia de procedimentos de ensaios em máquinas síncronas do IEEE.

$$X_{qs} = \frac{E_{\min}}{I_{\max}} \quad (3.4)$$

Com os valores obtidos da reactância segundo o eixo direto retira-se a reactância não saturada segundo o eixo em quadratura, X_{qu} . Em (3.5) representa-se como é obtida esta reactância.

$$X_{qu} = X_d \left(\frac{E_{\min}}{I_{\max}} \right) \left(\frac{I_{\min}}{I_{\max}} \right) \quad (3.5)$$

Assim, e com auxílio à representação vetorial dos parâmetros, retira-se a potência total gerada pelo gerador síncrono, considerando as perdas existentes. A Figura 3.17, representa o diagrama vetorial da máquina síncrona, segundo coordenadas dq .


 Figura 3.17 - Diagrama vetorial da máquina síncrona segundo o eixo dq

Do diagrama apresentado é retirado o valor da força eletromotriz, \bar{E}_0 , a partir da qual se obtêm a potência produzida considerando as perdas elétricas correspondentes.

Desta forma a potência total desenvolvida, P_d , é retirada a partir de (3.6).

$$P_d = 3 \operatorname{Re} \{ \bar{E}_0 \bar{I}^* \} \quad (3.6)$$

Desprezando perdas mecânicas por atrito e ventilação, considera-se que a potência desenvolvida pelo MD é a potência definida em (3.6).

Desta forma, considera-se que o binário desenvolvido no veio do MD, T_m , é determinado pela expressão apresentada em (3.7).

$$T_m \cong \frac{P_d}{n \frac{2\pi}{60}} \quad (3.7)$$

Posto isto, é possível representar a partir dos ensaios obtidos no setor 3.2.2, os valores de potência e binário produzidos pelo MD desprezando as perdas mecânicas. Desta forma, em anexo na Tabela I.1, encontram-se os resultados obtidos para todos os escalões de velocidade ensaiados.

Com os dados retirados, a traduzirem os valores referentes à P_d e T_m , é possível construir o mapa de eficiência, onde este terá como base a velocidade, a potência produzida e o consumo específico do MD.

Para a construção do mapa de eficiência do MD recorreu-se à ferramenta de simulação numérica Matlab® R2009b para que fosse possível a introdução de dados e a sua representação gráfica. Introduzidos os dados, foi necessário proceder a métodos de interpolação entre valores, visto se tratarem de amostras referentes ao funcionamento e de não ser prático retirar todos os valores que traduzem o funcionamento do motor, a cada valor de carga para cada instante. Daí, surgiu a necessidade de se obter uma amostragem que seja suficientemente representativa do comportamento do MD.

A representação gráfica do mapa de eficiência do MD, é retirada através de um gráfico de 3 dimensões representando-se os resultados numa superfície, ou retirada através de um gráfico a 2 dimensões com curvas de nível. As curvas de nível, representam os resultados da superfície gerada num gráfico a 2 dimensões. Na Figura 3.18, é representado o gráfico correspondente ao mapa de eficiência, numa representação a 3 dimensões, estando caracterizado através de uma superfície, o consumo específico de combustível em função da potência produzida e da velocidade do MD.

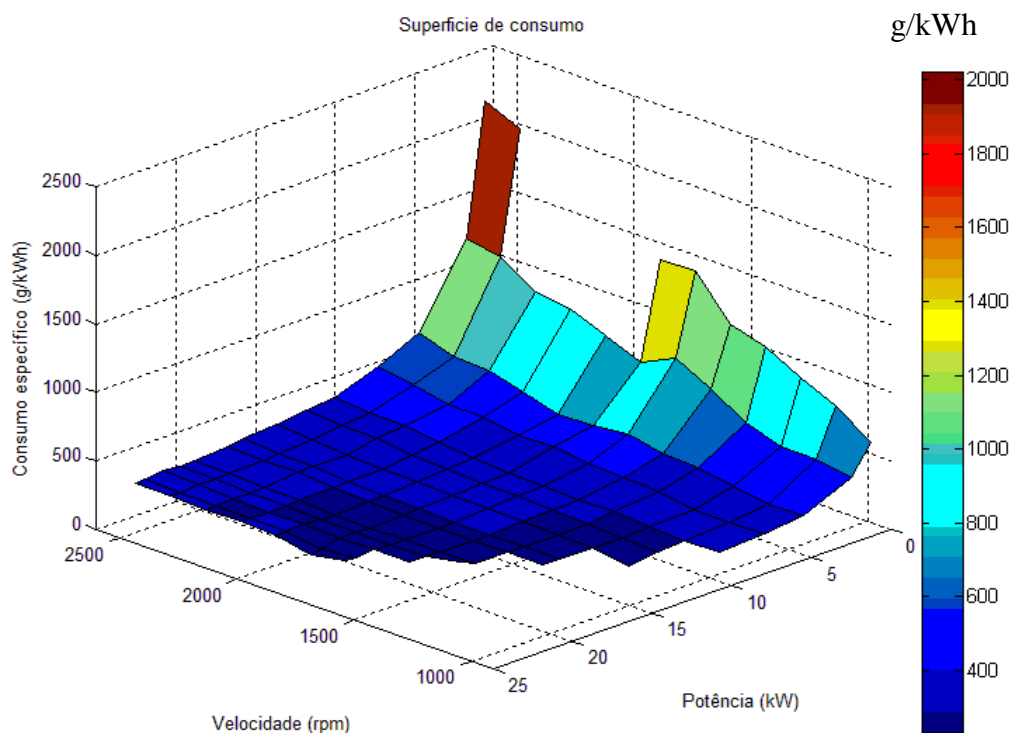


Figura 3.18 – Mapa de eficiência em superfície de consumo em função da velocidade e potência

A mesma representação pode ser feita, com o consumo específico de combustível em função da velocidade e do binário. Tal pode verificar-se na Figura 3.19.

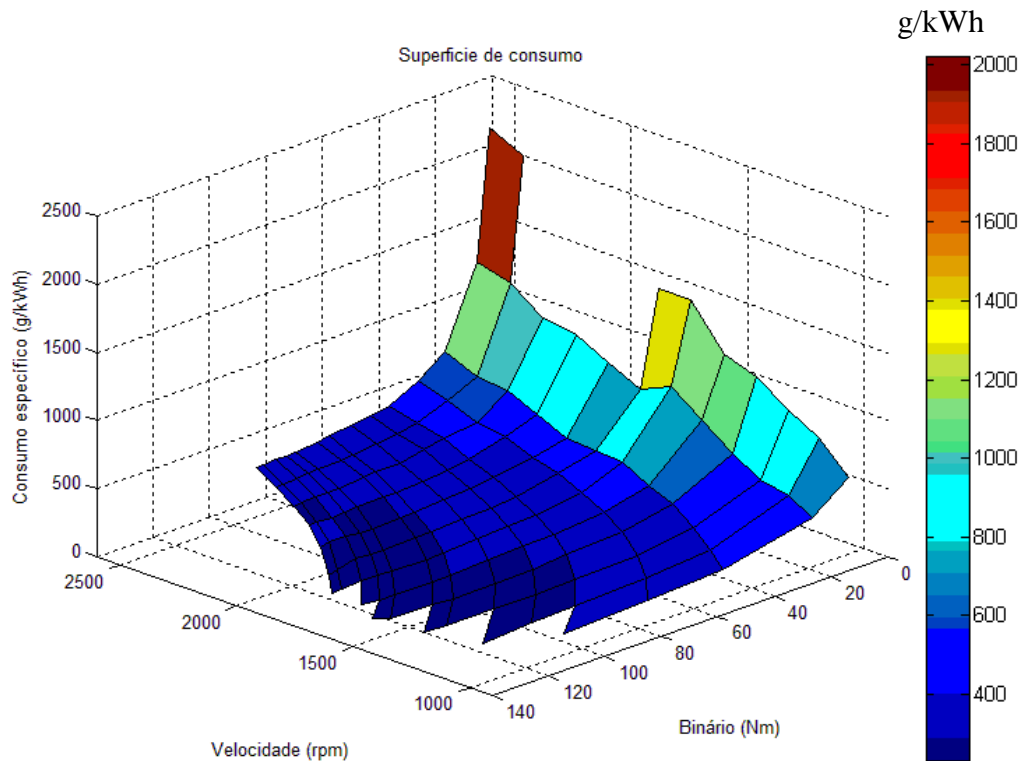


Figura 3.19 – Mapa de eficiência em superfície de consumo específico em função da velocidade e binário

Na Figura 3.20, é representado o gráfico correspondente ao mapa de eficiência, numa representação a 2 dimensões, estando caracterizado através de curvas de nível, o consumo específico de combustível em função do binário produzido e da velocidade do MD. Com a representação a azul, encontra-se a curva de potência máxima produzida pelo MD. A curva de binário máximo agora descrita, é considerada tendo em conta as perdas do gerador síncrono, admitindo-se de em diante que esta curva descreve os limites de binário do MD.

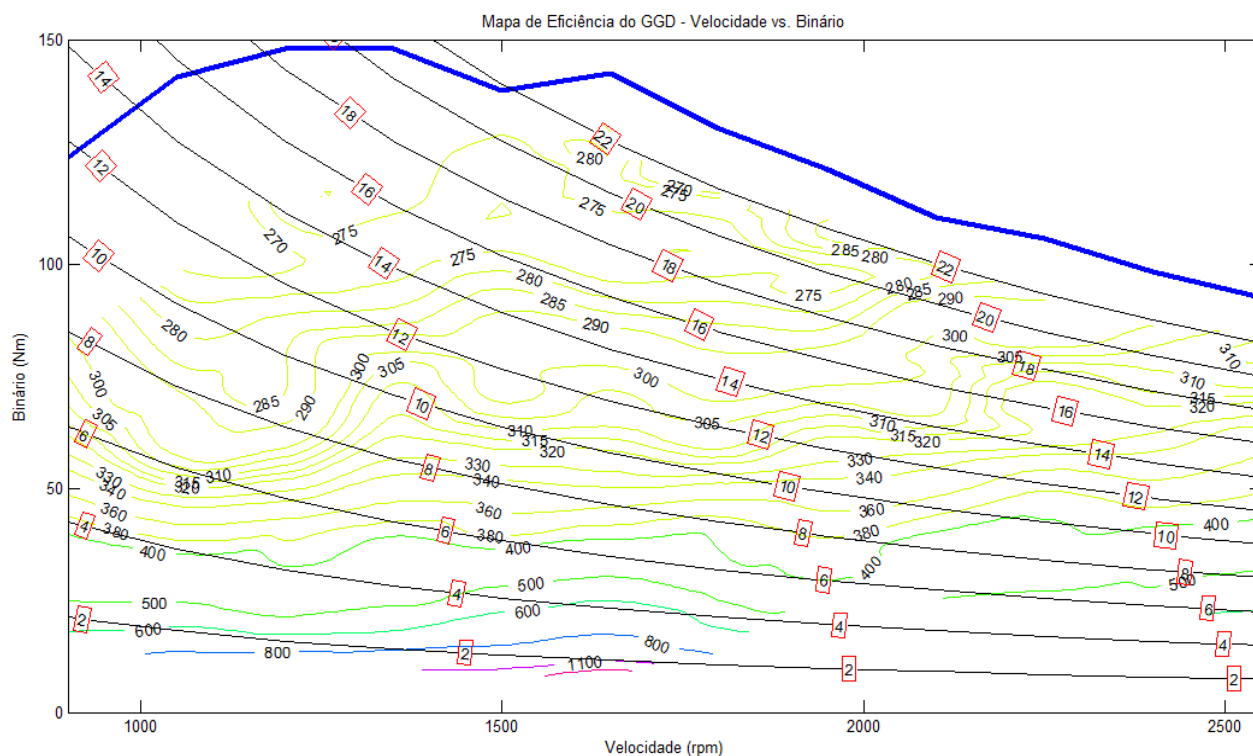


Figura 3.20 - Mapa de eficiência de Velocidade vs. Binário com curvas de potência

As curvas de nível representadas no mapa de eficiência da Figura 3.20, são referentes ao consumo específico de combustível em g/kWh. Adicionalmente encontram-se as curvas de potência a preto, onde indicam em que diferentes regimes de funcionamento do MD pode este fornecer à potência indicada. Estas curvas de potência, permitem também determinar em conjunto com as curvas de nível onde é o ponto ótimo de funcionamento para cada carga exigida, ou seja, onde o MD possui o seu funcionamento ótimo para cada velocidade e potência produzida.

Com a análise do mapa de eficiência obtido, conclui-se que o consumo específico de combustível é menor para potências elevadas, e que o consumo ótimo do MD para cada potência produzida varia com a velocidade. Tal pode verificar-se considerando a velocidade de 1500rpm, onde a cada intercepção com uma curva de potência superior, os consumos específicos de combustível indicados nas curvas de nível adjacentes são menores. A mesma análise pode ser feita por exemplo, considerando que para uma potência de 10kW, o funcionamento ótimo do MD encontra-se quando este está a funcionar a uma velocidade de aproximadamente 1100rpm. Com isto, verifica-se também que o facto de o GGD não possibilitar uma variação de velocidade a nível comercial, existem perdas para o utilizador do equipamento caso o GGD não esteja a funcionar a uma potência, onde a 1500rpm esteja no seu ponto ótimo de produção/consumo.

3.3 – Operação do motor de combustão Diesel em regime transitório

O MD é composto por sistemas mecânicos que possuem constantes de tempo mecânicas associadas a transitórios, sendo estas constantes, superiores em comparação com as constantes de tempo elétricas associadas igualmente a transitórios.

Assim, o MD quando sujeito a transitórios irá responder com uma determinada forma característica e tempos de estabilização diferentes consoante a perturbação causada. O regime transitório resultante, é importante na medida em que permite obter um conhecimento profundo das respostas do MD perante diferentes situações.

Torna-se assim necessário, contemplar este facto na emulação para que se consiga obter com boa aproximação, o comportamento do MD. A análise transitória é feita a partir da obtenção de respostas de velocidade do MD, quando sujeito a regimes transitórios de variação de carga.

3.3.1 – Ensaios dinâmicos do motor de combustão interna Diesel

Depois de realizados os ensaios ao GGD em regime permanente para obtenção do mapa de eficiência do MD, os ensaios dinâmicos do MD baseiam-se igualmente no uso de cargas elétricas a acoplar aos terminais do gerador síncrono, visto serem estas as condições em que um GGD é sujeito a condições transitórias, além das situações de arranque e paragem. A análise transitória foi conseguida através do uso de bancos de resistências que com mudanças de escalões na potência requerida ao gerador síncrono, impuseram-se transitórios mecânicos ao MD.

A partir destes escalões é possível impor um transitório na resposta de velocidade do MD, visto que com um binário de carga superior e com uma aceleração constante, origina-se um decaimento na velocidade ou em caso contrário com o deslastre de cargas, onde o MD com uma aceleração constante e com menor binário de carga a sua velocidade aumenta. É a partir deste decaimento ou aumento de velocidade que se retira a resposta e a característica do sistema em situações transitórias.

Desta forma, foram considerados 3 diferentes níveis de velocidade de funcionamento para a realização dos ensaios, como é demonstrado na Tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Velocidades utilizadas na realização dos ensaios dinâmicos

| Velocidade (rpm) | | |
|------------------|------|------|
| 1200 | 1800 | 2400 |

Com os níveis de velocidade escolhidos, foi necessário considerar igualmente escalões de carga a impor ao MD, e assim de acordo com os ensaios usualmente realizados neste tipo de fins foi considerado que a carga num MD varia entre os 10% e os 90% da sua capacidade máxima, [43], de acordo com a variação na carga apresentada na Tabela 3.5:

Tabela 3.5 - Escalões de carga utilizados em percentagem do valor máximo

| Carga elétrica (%) | | |
|--------------------|------------|--------|
| Mínimo | Intermédio | Máximo |
| 10 | 50 | 90 |

Os valores representados na Tabela 3.5, são referentes a valores percentuais da carga total que o GGD admite a cada velocidade.

Escolhidos os escalões de carga a considerar para os ensaios, foram considerados as seguintes situações para realização de ensaios:

- Colocação de escalões de carga (escalão mínimo, intermédio e máximo);
- Deslastre de escalões de carga (escalão mínimo, intermédio e máximo);
- Colocação e deslastre de escalões de carga (escalão mínimo e máximo);
- Arranque e paragem em vazio;
- Arranque e paragem a plena carga (escalão máximo).

Desta forma, o objetivo destes ensaios é retirar a resposta de velocidade do grupo quando se colocam ou retiram escalões de carga. Para tal, foi implementada uma taquigeradora acoplada ao veio do MD, onde a função desta é converter o número de voltas dadas em rotações por minuto numa saída de tensão. Esta foi acoplada ao veio do MD por intermédio de uma correia e por uma

polia com furação e passo de rosca feita à medida, para fixação ao veio do MD. Na Figura 3.21, está patente a taquigeradora instalada no GGD para leitura da velocidade no veio do MD.



Figura 3.21 – Taquigeradora utilizada para medição de velocidade no MD

A tensão de saída da taquigeradora é proporcional ao número de rotações por minuto, o que permite observar a resposta no tempo da velocidade, através do registo da tensão instantânea aos seus terminais.

A taquigeradora utilizada possui as características apresentadas na Tabela 3.6:

Tabela 3.6 - Características elétricas e mecânica da taquigeradora

| | |
|----------------------|------|
| Volt/rpm | 0,02 |
| Número máximo de rpm | 8000 |

Com a taquigeradora e com auxílio de um osciloscópio digital para os registos dos transitórios ocorridos, efetuaram-se os ensaios no MD.

Primeiramente foram realizados os ensaios dinâmicos, relativos à colocação e deslastre de carga com o GGD em funcionamento.

Desta forma, os escalões de potência foram conseguidos através do uso do barramento do GGD e das saídas de tensão do grupo referentes às tomadas de 16A e de 32A. As referidas saídas possuem disjuntores que permitem controlar de forma independente os escalões de carga impostos no GGD. Esta solução permite assim adicionar ou deslastrar cargas de forma equilibrada e eficaz.

Assim, os ensaios consistem em regular em vazio a velocidade do MD em cada uma das velocidades indicadas na Tabela 3.4, onde o escalão mínimo de carga de 10% é imediatamente ligado servindo como base a partir da qual se realizam os ensaios. Com isto, é então adicionado o seguinte escalão retirando-se por sua vez a resposta de velocidade a partir do osciloscópio. Já no escalão intermédio de 50% da carga, adicionou-se escalão máximo de carga de 90%, retirando-se novamente a resposta. Com todos os escalões adicionados procede-se então ao deslastre de cargas, realizando-se assim os mesmos registos agora para um decréscimo de escalões de carga.

Estes ensaios foram repetidos da mesma forma, para todas as velocidades do MD consideradas na Tabela 3.4.

Assim, para a velocidade de referência de 1200rpm, no ensaio de colocação de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.22.

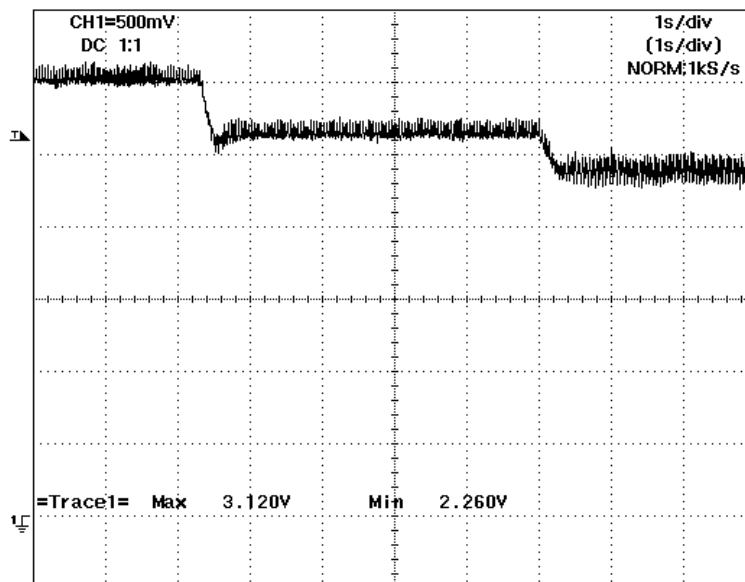


Figura 3.22 – Ensaio de colocação de cargas a 1200rpm

Para a velocidade de referência de 1200rpm, no ensaio de deslastre de cargas de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

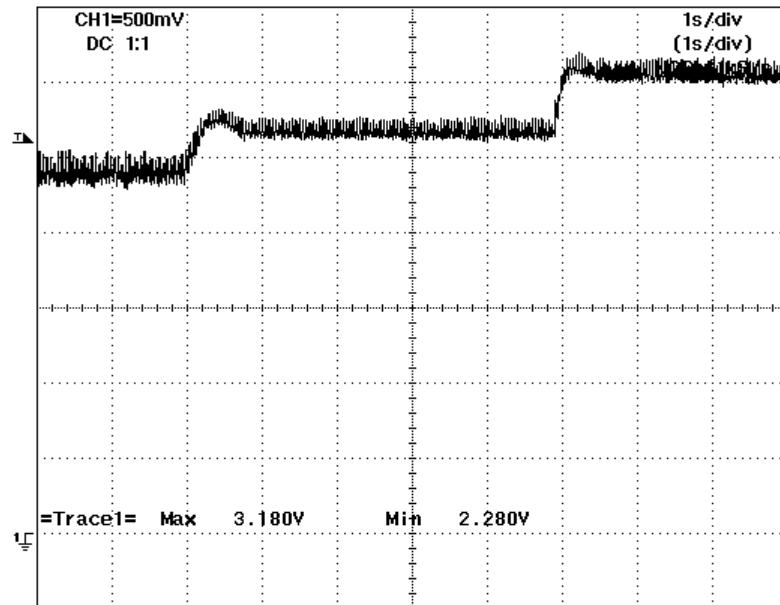


Figura 3.23 – Ensaio de deslaste de cargas a 1200rpm

Foram igualmente realizados ensaios de colocação e deslaste do escalão máximo de carga, correspondente a 90% da carga máxima. O procedimento de ensaio consistiu em colocar o GGD a funcionar com o escalão mínimo de carga de 10%, tendo sido posteriormente colocado e deslastrado o escalão máximo de 90%. Assim, para a velocidade de referência de 1200rpm, no ensaio de colocação do escalão máximo de 90% de carga e deslaste de carga para o escalão mínimo de 10%, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.24.

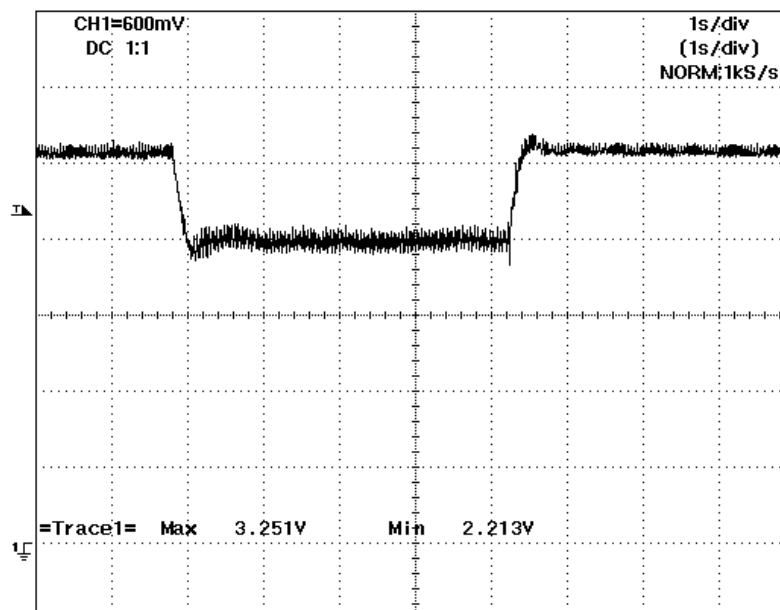


Figura 3.24 – Ensaio de colocação e deslaste do escalão de 90% de carga à velocidade de 1200rpm

Realizados os ensaios de variação de carga, foram realizados os ensaios de arranque e paragem à plena carga. Para estes ensaios, foi feita a regulação de velocidade do grupo para os três níveis de acordo com a Tabela 3.4. Feita a regulação, e de acordo com a curva de binário máximo retirada nos ensaios de obtenção do mapa de eficiência, foram colocadas as cargas referentes a 90% da carga total para cada velocidade.

Assim, o sistema foi ligado para cada velocidade à plena carga, no entanto como a regulação de velocidade foi feita em vazio, existe um decaimento da mesma, passando a funcionar na situação de binário máximo para uma velocidade mais baixa, em que a aceleração para o qual o motor foi regulado é suficiente para suportar a carga imposta.

Desta forma, a carga imposta não se refere aos 90% da carga à velocidade regulada, mas sim à plena carga da velocidade final. A razão da escolha do ensaio ser desta forma, recai sobre o facto de poder não haver a previsibilidade de carga quando é ligado um GGD quando este se encontra regulado para uma determinada velocidade. Este ensaio permite assim, analisar qual o comportamento do MD perante uma situação semelhante.

Para o ensaio de arranque e paragem à plena carga, com a regulação a 1200rpm, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na Figura 3.25:

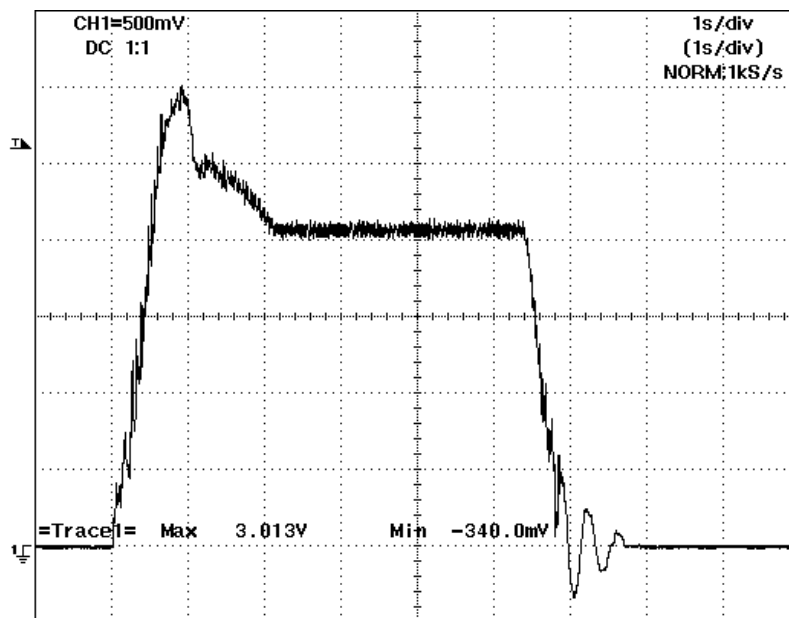


Figura 3.25 – Ensaio de arranque e paragem à plena carga a 1200rpm

Estão presentes no Anexo I.3, os restantes ensaios de arranque e paragem à plena carga, para as diferentes velocidades consideradas na Tabela 3.4.

Para além dos ensaios de arranque e paragem à plena carga, foram também realizados ensaios de arranque e paragem em vazio, por forma a se abranger a maior gama de funcionamento possível do MD. Para o ensaio de arranque e paragem em vazio, com a regulação a 1200rpm, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na Figura 3.26:

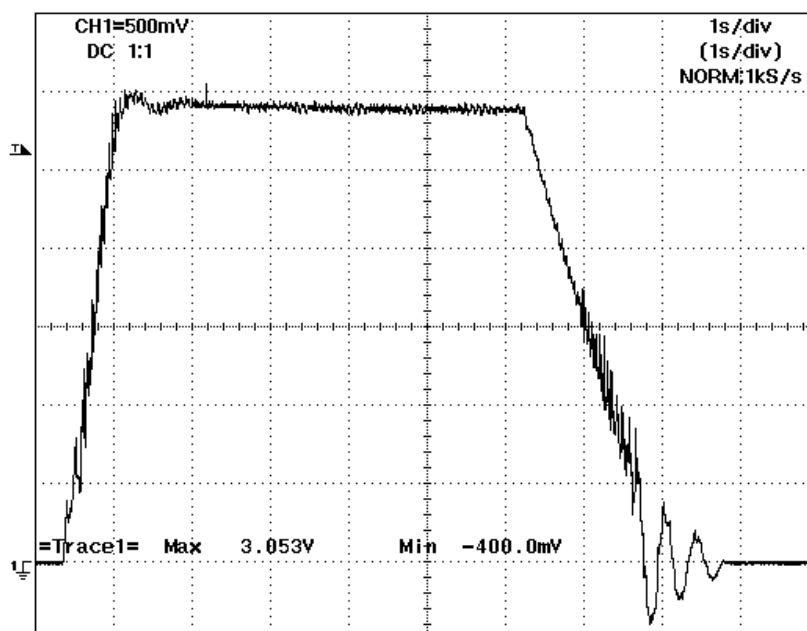


Figura 3.26 – Ensaio de arranque e paragem em vazio a 1200 rpm

Estão presentes no Anexo I.3, os restantes ensaios realizados de colocação e deslastre de cargas, de arranque paragem em vazio e em carga, para as diferentes velocidades.

Numa primeira análise às respostas do sistema, considera-se que o sistema se aproxima a um sistema de segunda ordem o que implica conhecer parâmetros como a frequência natural de amortecimento e constantes de amortecimento, para que se possa caracterizar este sistema a partir de uma equação de segunda ordem.

Assim, considerando que a resposta do sistema se aproxima a um sistema de segunda ordem, a partir dos ensaios realizados, procede-se à análise dos mesmos para retirar os parâmetros necessários, de forma a se conseguir emular o mais aproximadamente possível a resposta dinâmica do MD a partir de um sistema de segunda ordem.

3.3.2 – Obtenção do modelo dinâmico do motor de combustão interna Diesel

O modelo dinâmico do MD é obtido através da resposta de velocidade do sistema, que como modelo matemático se considera a sua aproximação a uma resposta de um sistema de segunda ordem.

Um sistema de segunda ordem é caracterizado como tendo uma resposta tal como é demonstrado na Figura 3.27:

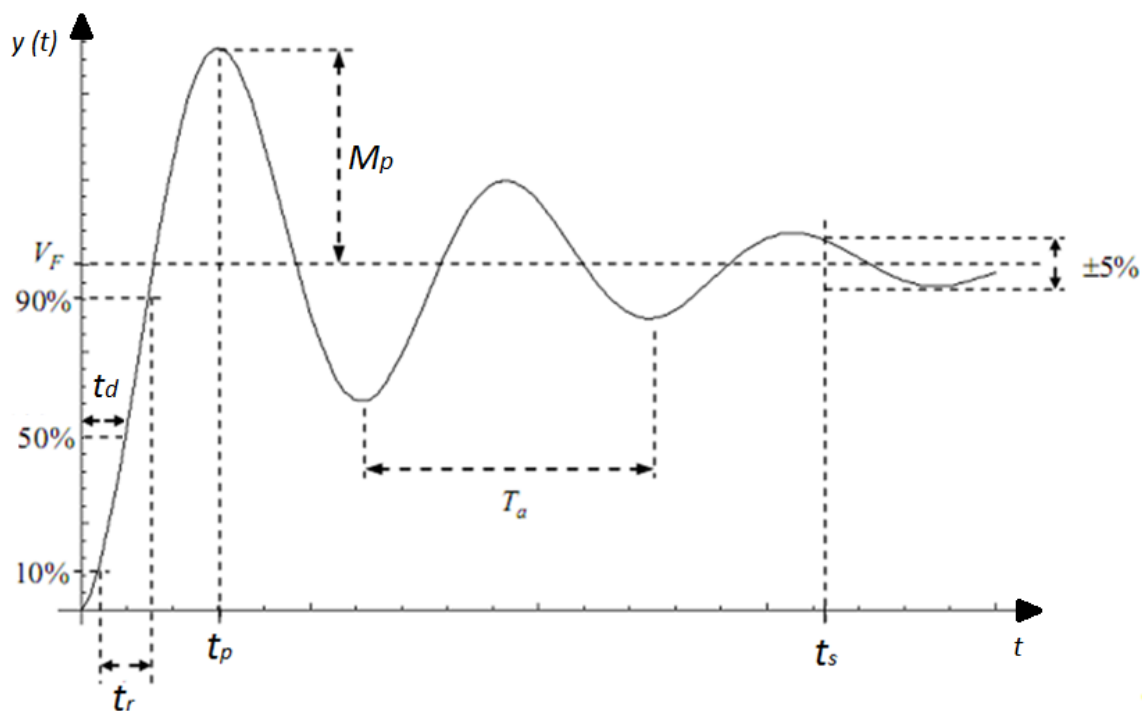


Figura 3.27 – Resposta no tempo de um sistema de segunda ordem, (Adaptado de [44])

Na Figura 3.27 é representada a resposta de um sistema de segunda ordem a um escalão, que para caracterizar é importante ter em conta os parâmetros:

- V_f – Valor final de estabelecimento, este corresponde ao valor do ganho para onde o sistema tende a estabilizar;
- t_r – Tempo de subida ou crescimento, é o tempo que a resposta leva entre os dois extremos de um intervalo, este geralmente é em percentagem do valor final;
- M_p – Sobrelevação, corresponde à variação entre o valor máximo que a resposta do sistema atinge até ao valor do ganho (V_f);

- t_p – Tempo de pico, é referente ao tempo que o sistema leva do momento em que recebe o escalão até ao seu valor de máxima amplitude;
- t_s – Tempo de estabelecimento, corresponde ao tempo que o sistema leva a atingir uma determinada percentagem do valor do ganho (V_f);
- t_d – Tempo de atraso, corresponde ao tempo que o sistema leva a atingir 50% do valor do ganho (V_f);
- T_a – Período oscilatório, define o período ou a frequência das oscilações amortecidas, caso estas sejam periódicas.

O sistema por sua vez possui uma resposta que se pode aproximar a um sistema de segunda ordem. Este facto, permite construir a resposta dinâmica do sistema a partir de uma equação de segunda ordem no domínio da frequência, s , tal como é representado em (3.8):

$$s^2 + 2\delta\omega_0s + \omega_0^2 = 0 \quad (3.8)$$

Em (3.8), δ e ω_0 representam, respectivamente, a constante de amortecimento e a frequência natural não amortecida.

De (3.8) aplicando a transformada inversa de Laplace, obtêm-se a equação no domínio do tempo, t , (3.9):

$$y(t) = 1(t) - \frac{e^{-\delta\omega_0t}}{\sqrt{1-\delta^2}} \times \text{sen}[\omega_a t + \cos^{-1}(\delta)], \text{ para } t \geq 0 \quad (3.9)$$

Em (3.9), ω_a representa a frequência natural amortecida.

Através de (3.10), sabe-se que:

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1-\delta^2} \quad (3.10)$$

Com a análise da resposta do MD, resultante dos ensaios em vazio de arranque e paragem, retira-se o valor correspondente à frequência natural não amortecida, ω_0 .

A obtenção da ω_0 e dos restantes parâmetros que caracterizam um sistema de segunda ordem, é demonstrada a partir do exemplo da resposta obtida no ensaio de arranque e paragem à velocidade de 1500rpm, Figura 3.28:

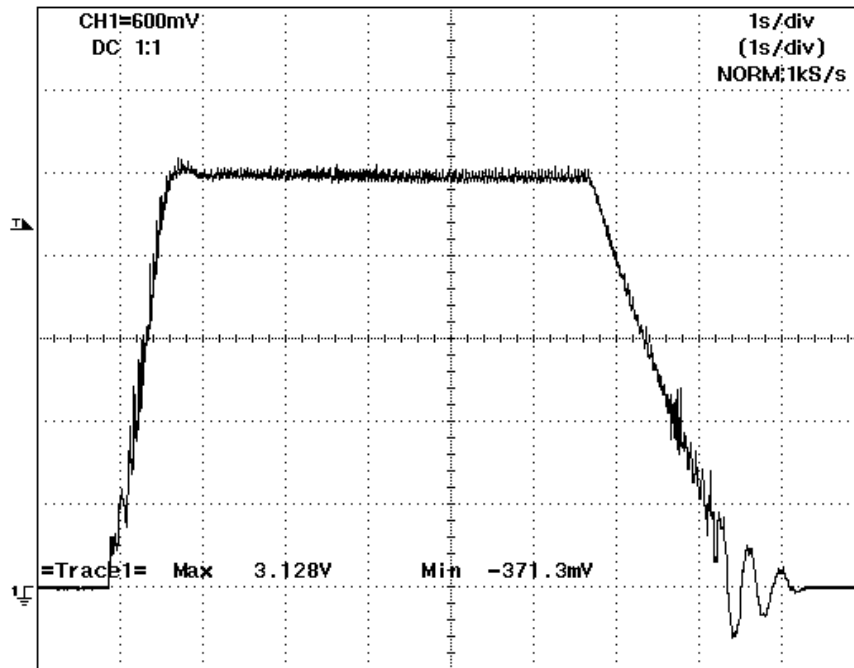


Figura 3.28 – Ensaio de arranque e paragem em vazio a 1500rpm

Da Figura 3.28, na situação de arranque, tem-se que:

$$y(t_p) = 1564rpm, \quad y(t_p) - \text{Valor máximo de } y(t)$$

$$y(\infty) = 1500rpm, \quad y(\infty) - \text{Valor de escalão}$$

Então, a sobrelevação relativa, M_p , dada em (3.11), é:

$$M_p(\%) = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100 = 4,33\% \quad (3.11)$$

A partir da relação entre a sobrelevação relativa e a constante de amortecimento representada na Figura 3.29, obtêm-se a constante de amortecimento, [44]:

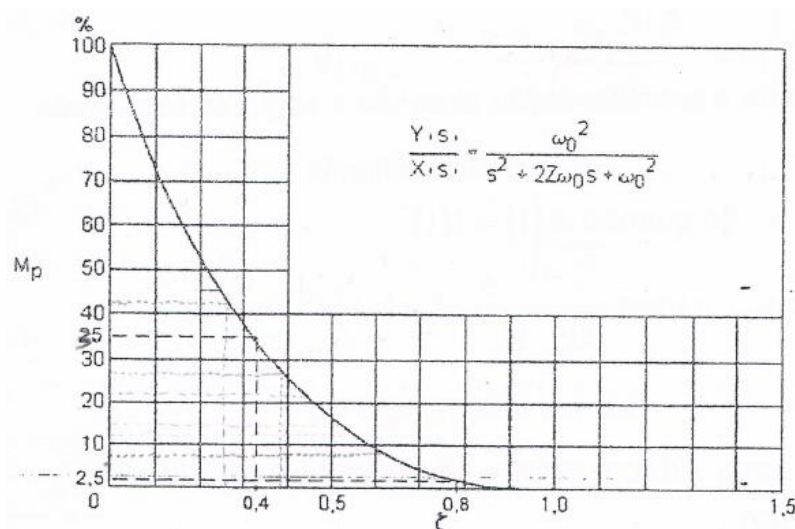


Figura 3.29 – Sobrelevação relativa em função da constante de amortecimento (Extraído de [44])

Assim, retira-se que a constante de amortecimento para o valor de sobrelevação relativa calculado, é de $\delta \approx 0,70$.

Da análise da Figura 3.28, retira-se também que $t_r = 600ms$, $t_p = 820ms$, $t_d = 460ms$.

Assim, em (3.12) retira-se que:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\delta^2}} \Leftrightarrow \omega_0 = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1-\delta^2}} = 5,36Hz \quad (3.12)$$

Então, por intermédio de (3.10) tira-se que:

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1-\delta^2} = 3,83Hz$$

Com os parâmetros associados à equação de segunda ordem conhecidos, o sistema possui caracterização ao nível da sua dinâmica.

3.4 – Modelo matemático do motor de combustão interna Diesel

Os ensaios realizados para a determinação do comportamento em regime permanente e dos ensaios para a determinação do comportamento dinâmico do MD, torna assim possível a caracterização matemática do GGD.

Assim, o modelo matemático que traduz o comportamento do grupo, é constituído pelo mapa de eficiência, que devolve o consumo específico do MD em função da potência produzida e velocidade do MD, mas também é composto pela caracterização da resposta de velocidade do sistema, traduzida por um sistema de segunda ordem.

Para efeitos de emulação do MD, apenas é implementada a caracterização da saída de velocidade.

O modelo do sistema para a caracterização de velocidade é assim um modelo caixa preta, onde se caracteriza unicamente a saída de velocidade do MD, em detrimento das características físicas do mesmo. O modelo matemático do MD, é assim constituído pelas equações que descrevem o comportamento de um sistema de segunda ordem. Para isto, obtiveram-se os parâmetros que constituem a equação (3.9) a partir da análise de cada resposta registada nos ensaios dinâmicos realizados ao MD. Desta forma, para cada resposta registada, retiraram-se os valores correspondentes das variáveis da constante de amortecimento, de frequência natural não amortecida e da frequência natural amortecida.

No anexo I.4, são apresentados os resultados das análises realizadas às respostas de velocidade. Estão presentes para cada resposta registada, os valores das grandezas necessárias para caracterizar um sistema de 2ª ordem, de acordo com (3.9). Na Tabela 3.7, é apresentado para efeitos exemplificativos, os resultados das grandezas referentes à caracterização da resposta de velocidade obtida no ensaio de arranque e paragem em vazio a 1500rpm, tal como calculado no setor 3.3.2.

Tabela 3.7 – Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade na situação de arranque e paragem em vazio a 1500rpm

| Velocidade (rpm) | Vazio | Arranque | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) | |
|--------------------|-------|-----------------|--------------------------|------------------------|--|
| 1500 | | | 0 | 1500 | |
| Ensaio | | M_p (%) | 4,27 | | |
| Arranque / Paragem | | δ | 0,70 | | |
| | | t_p (s) | 0,82 | | |
| | | t_r (s) | 0,60 | | |
| | | t_d (s) | 0,46 | | |
| | | ω_0 (Hz) | 5,36 | | |
| | | ω_a (Hz) | 3,83 | | |
| | | Paragem | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) | |
| | | | 1500 | 0 | |
| | | | M_p (%) | 12,08 | |
| | | | δ | 0,55 | |
| | | | t_p (s) | 0,90 | |
| | | | t_r (s) | 0,56 | |
| | | | t_d (s) | 0,36 | |
| | | | ω_0 (Hz) | 4,18 | |
| | | | ω_a (Hz) | 3,49 | |

Com base em (3.9) e nos diferentes valores das grandezas, obtidos a partir dos registos de velocidade dos ensaios dinâmicos, será realizada a emulação do MD.

3.5 – Conclusões

Resultado dos diversos e diferentes ensaios realizados com fins distintos, é possível caracterizar o funcionamento do GGD e seus constituintes principais, nomeadamente o gerador síncrono e o MD. No que diz respeito ao MD este é assim caracterizado em relação ao seu funcionamento em regime permanente e também no que se refere à sua dinâmica.

Com os resultados obtidos torna-se possível realizar o processo de emulação do MD.

CAPÍTULO 4

EMULAÇÃO DO MOTOR DIESEL

Resumo

Neste capítulo é abordada a concretização da emulação do MD, com a apresentação e discussão de resultados.

4 – EMULAÇÃO DO MOTOR DIESEL

Na emulação do MD os resultados obtidos para determinação do comportamento do mesmo, quer em regime permanente quer em dinâmico, serão implementados no funcionamento de dois motores assíncronos trifásicos para que estes possuam uma resposta idêntica ao MD e respetiva carga imposta. O processo de emulação pode ser genericamente apresentado na Figura 4.1.

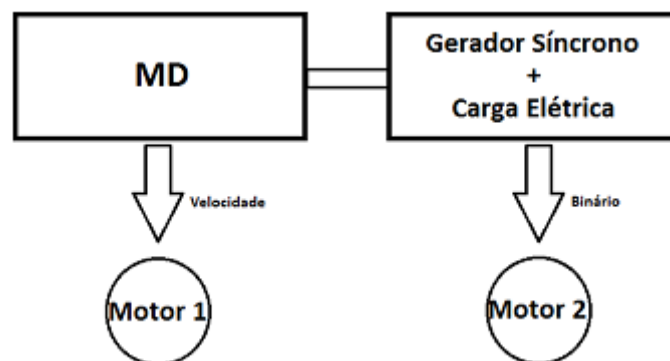


Figura 4.1 – Processo de emulação do MD

A emulação do comportamento do MD, é conseguida com auxílio a uma comunicação e interface construída no *software* LabView 6.1. Cada motor assíncrono trifásico, é controlado por intermédio de dois conversores de potência ACS600 da marca ABB®, possuindo estes comunicação entre si através de fibra ótica. As duas unidades de conversores de potência, funcionam como *slaves* onde são controlados através de uma unidade informática que terá a função de *master*, estando a comunicação assegurada através de um módulo NMBA-01 da ABB®. Este módulo, permite a comunicação entre RS-485 com a fibra ótica utilizada pelos conversores de potência.

A comunicação com o *master* é feita por porta série RS-232, que é convertida pela unidade de conexão a comutador NPCU-01 da ABB® para RS-485. No esquema representado na Figura 4.2, é expressa a forma como a comunicação é realizada.

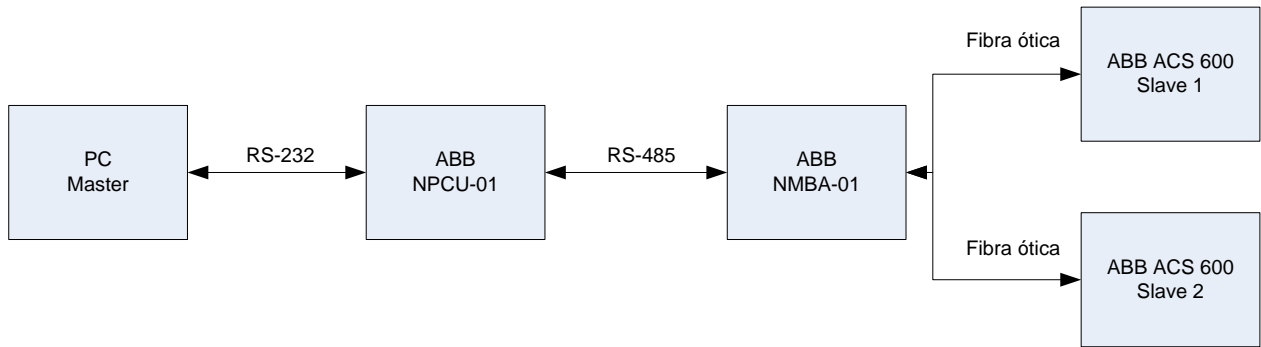


Figura 4.2 - Esquema de comunicação existente entre módulos

É utilizado o protocolo Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) para a comunicação, que contempla uma mensagem de resposta a cada mensagem que é enviada para os conversores de potência.

4.1 – Acionamentos com motores assíncronos trifásicos

Associada à utilização de máquinas elétricas, está o acionamento dos mesmos. O caso dos motores assíncronos trifásicos utilizados neste trabalho não é exceção.

O controle de uma máquina assíncrona pode ser feito por controle escalar através da variação de tensão, de frequência ou pelas duas. Pode também por sua vez, ser feito através de controle vetorial com orientação de campo (direta ou indireta) ou por controle direto do binário e fluxo estatórico, [45].

O acionamento dos motores assíncronos trifásicos utilizados no trabalho, conta com a técnica de controle direto de binário que permite o desacoplamento entre o binário e o fluxo, fazendo destas as variáveis de controle. A razão fundamental para a escolha deste método, é relativa à disponibilidade existente dos conversores de potência para este trabalho, que possuem o método de controle direto de binário. Além deste fator determinante, com o controle direto de binário garantem-se respostas dinâmicas de binário e velocidade mais rápidas, fator importante quando é pretendido um comportamento idêntico ao de uma outra máquina, incluindo a sua dinâmica.

Para este acionamento, é garantida uma alimentação trifásica aos conversores de potência com proteção a montante dos mesmos e proteção a jusante através de disjuntores motores, para proteção às máquinas assíncronas mesmo considerando a existência de proteções nos

conversores de potência para o efeito. Tal facto, foi considerado para permitir a alimentação dos motores a partir de arranque direto, para fins não aqui descritos nem tidos em consideração.

Os conversores de potência utilizados, são parametrizados consoante o que o utilizador pretende, podendo assim o controlo ser feito de forma local a partir da consola que estes têm acoplado, mas também a partir de controlo remoto através de comunicação por um *software* disponibilizado para o efeito ou a partir de comunicação por porta série com protocolo Modbus RTU, sendo este último tipo o utilizado.

Na parametrização da retroação, é então escolhido o *encoder* GHM510596R/762 da IDEACOD® para a leitura de velocidade, o que permite que esta não seja feita com base numa estimativa por parte do conversor de potência, garantindo assim um controlo mais preciso. O *encoder* é parametrizado de acordo com o número impulsos que envia ao conversor de potência por cada volta. Desta forma, a parametrização correta foi definida com 360 impulsos por cada volta, o que equivale a um impulso por grau.

4.1.1 – Controlo directo de binário

Dada a escolha do tipo de controlo para os motores assíncronos utilizados recair sobre o controlo directo de binário, importa caracterizá-lo no que respeita ao seu funcionamento.

O controlo direto de binário (DTC – Direct Torque Control) é uma recente tecnologia em acionamentos de máquinas de indução que recorre ao desacoplamento entre o binário e o fluxo. Este tipo de controlo utiliza as grandezas de binário e fluxo do estator da máquina como variáveis de controlo, estabelecendo-as diretamente a partir do inversor de potência. Este método consiste no cálculo instantâneo dos valores do fluxo e do binário da máquina de modo a poder controlá-los vetorialmente.

O controlo destes vetores, é realizado partindo comando dos estados de comutação do ondulator de tensão, na medida em que é este que impõe os valores dos vetores de fluxo e de binário, por intermédio do vetor de tensão estatórica aplicada à máquina, [46].

Na Figura 4.3, são apresentados os estados de comutação de um ondulator de tensão trifásico em ponte, alimentado a partir de uma fonte de tensão de CC, e a sua relação com os vetores de tensão do estator.

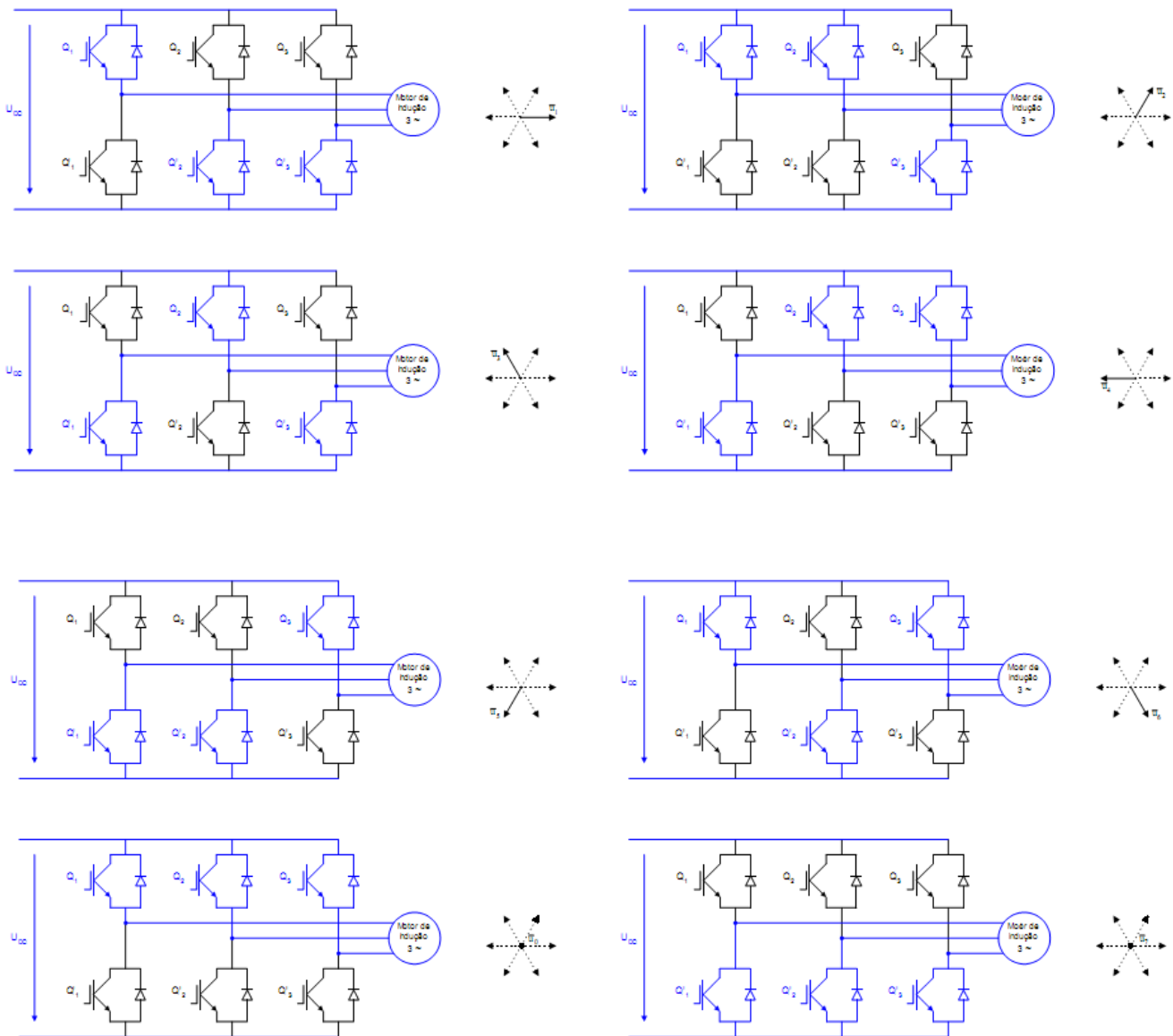


Figura 4.3 – Representação dos estados de comutação do ondulator de tensão trifásico em ponte e a relação com os vetores do estator (extraído de [46])

Os estados de comutação representados, originam 6 vetores de tensão à saída do ondulator, mais 2 vetores de tensão nulos.

Neste tipo de controlo, é determinado em que setor se encontra a posição do fluxo, de forma a seleccionar o estado de comutação do ondulator, e por sua vez a aplicar o vetor de tensão mais indicado à máquina. A localização do vetor do fluxo é obtida, considerando os sinais das suas componentes dq permitindo uma fácil implementação, na medida em necessita apenas de comparadores, [46].

Considerando a estratégia de aplicação de vetores de tensão, consegue-se por sua vez controlar o binário eletromagnético e fluxo estatórico.

O binário eletromagnético pode ser descrito, partindo das equações da máquina de indução no referencial estacionário, isto é, solidário com o estator, equações estas que não são aqui apresentadas. O binário eletromagnético é então descrito em (3.13), [46]:

$$T_e = \frac{3}{2} \rho_s \left| \overline{\varphi_s} \right| \left| \overline{i_s} \right| \text{sen}(\alpha_s - \rho_s) = \frac{3}{2} \rho_s \left| \overline{\varphi_s} \right| \left| \overline{i_s} \right| \text{sen}(\alpha) \quad (3.13)$$

Em (3.13), a equação, é composta pelos seguintes parâmetros:

- T_e – Binário eletromagnético;
- $\overline{\varphi_s}$ – Vetor de fluxo estatórico;
- $\overline{i_s}$ – Vetor da corrente do estator;
- α_s – Ângulo do vetor da corrente do estator em relação ao eixo direto d;
- ρ_s – Ângulo do vetor de fluxo estatórico em relação ao eixo direto d.

A representação dos vetores estatóricos do fluxo e da corrente no referencial dq , pode ser feita de acordo com a Figura 4.4:

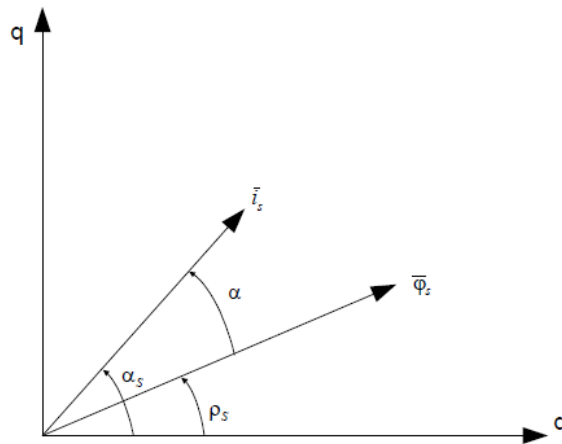


Figura 4.4 – Vetores estatóricos do fluxo e corrente no referencial dq (extraído de [46])

De acordo com a Figura 4.4 e em (3.13), se o módulo do vetor do fluxo do estator for mantido constante e o ângulo ρ_s variar, então obtém-se por consequência, uma variação do binário eletromagnético, T_e .

O controlo direto de binário, cujo princípio geral de funcionamento se apresenta na Figura 4.5, foi desenvolvido para acionamentos de máquinas de indução trifásicas, [47].

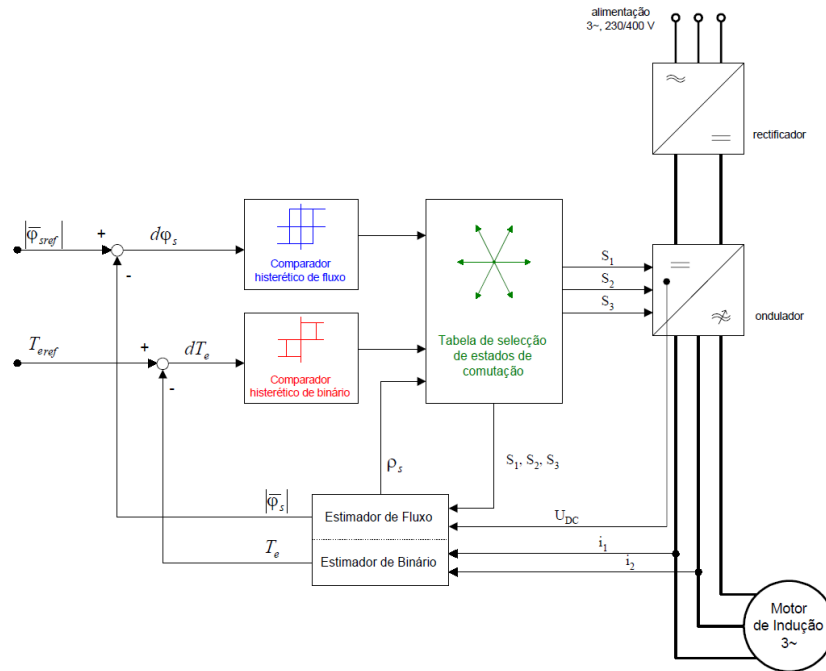


Figura 4.5 – Diagrama de blocos característico do funcionamento do DTC (extraído de [46])

No diagrama de blocos do DTC representado na Figura 4.5, são apresentados dois anéis de controlo distintos relativos ao módulo do vetor de fluxo estatórico, $|\bar{\varphi}_s|$, mas também ao binário eletromagnético, T_e .

O valor de referência do módulo do vetor de fluxo estatórico, $|\bar{\varphi}_{sref}|$, é comparado com o valor atual do módulo do vetor de fluxo, $|\bar{\varphi}_s|$, sendo o erro resultante, $d\varphi_s$, aplicado ao comparador de histerese a dois níveis do fluxo do estator. De forma idêntica, no anel de controlo do binário eletromagnético, o valor de referência, T_{eref} , é comparado com o valor atual, T_e , determinado pelo bloco estimador de binário, sendo por sua vez o erro resultante, dT_e , aplicado ao comparador histerético a três níveis do binário eletromagnético, [46].

As saídas dos comparadores histeréticos de fluxo e de binário, simultaneamente com a posição do vetor de fluxo do estator, ρ_s , são utilizadas no bloco de seleção de estados de comutação do ondulador de tensão. Este bloco utiliza uma tabela de seleção de estados de comutação e define qual o vetor de tensão a ser aplicado pelo ondulador de tensão, de modo a que o fluxo estatórico e o binário eletromagnético se situem dentro das suas bandas de histerese. No DTC as tensões são reconstruídas através do estado de comutação do ondulador, indicado pelos sinais S1, S2 e

S3, e pela tensão de alimentação do ondulator, U_{DC} , [48]. O estimador do binário eletromagnético, calcula o valor de T_e através da medição de duas correntes estatóricas.

As principais vantagens do DTC, encontram-se nas respostas dinâmicas do binário e velocidade/posição mais rápidas e maior insensibilidade à variação dos parâmetros da máquina, [49].

Apresentada a técnica de controlo dos conversores de potência utilizados neste trabalho de emulação, torna-se também importante caracterizar os conversores que suportam esta técnica bem como a parametrização usada.

4.1.2 – Parametrização dos conversores de potência

Os conversores de potência utilizados, pertencem a uma família de conversores de potência desenvolvidos pela ABB®, ACS 600, para o acionamento de máquinas assíncronas, que utilizam o controlo direto de binário.

A família de conversores de potência ACS 600, está dividida em três segmentos segundo o tipo de aplicação, como se observa na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela de seleção de conversores de potência

| ACS 600 | Modelo | Aplicações |
|-----------------------|---------|---|
| ACS 600 SingleDrive | ACS 600 | Bombas, ventiladores, misturadoras, bobinadoras |
| ACS 600 MotionControl | ACP 600 | Controlo de posição, sincronização |
| ACS 600 CraneDrive | ACC 600 | Gruas, guindastes |

A Tabela 4.2 apresenta as principais características técnicas dos conversores de potência utilizados.

Tabela 4.2 – Características técnicas dos conversores de potência, ACS 600

| Designação | Valor |
|----------------------------------|---|
| Potência de saída | ≤ 3 kW |
| Tensão de alimentação | 380, 400, 415 V |
| Retificador | Trifásico em ponte não controlada |
| Ondulador de tensão | Trifásico em ponte baseado em IGBT |
| Consola de comando, Idiomas | CDP 312, Inglês e Alemão |
| Tipos de controlo seleccionáveis | Controlo de binário; Controlo de velocidade; Controlo de posição; Sincronização |
| Compatibilidade Eletromagnética | De acordo com a norma EN 61800-3 para conversores de potência |
| Grau de proteção | IP 22 |

Cada conversor dispõe de uma consola de comando, modelo CDP 312 da ABB®, que permite ao utilizador efetuar configurações dos parâmetros, consultar valores de diversas grandezas atuais e atuar o acionamento.

Para o trabalho cada conversor de potência controla diferentes parâmetros em cada motor, ou seja, um conversor de potência é dedicado e parametrizado para controlar o binário num motor e o outro conversor de potência controla a velocidade noutra motor.

No que toca à parametrização dos conversores de potência esta tem de ser ajustada consoante as características da comunicação utilizada e com as máquinas que se pretende controlar e acoplar a cada conversor de potência. A parametrização dos conversores de potência contempla também os ganhos do controlador PI (Proporcional Integrador), a seleção dos limites mínimo e máximo de velocidade e binário, o tempo da rampa de aceleração e desaceleração, a existência de filtros e que retroação é utilizada para o controlo de velocidade.

No que diz respeito à retroação, os conversores de potência funcionam em cadeia fechada, isto é, a retroação permite uma leitura da velocidade real, para que em relação à frequência o erro seja corrigido através do controlador PI. Assim sendo, o conversor de potência dedicado ao controlo

de velocidade possui uma retroação a partir de um *encoder* que faz a leitura no veio da velocidade real. Esta informação, dá então entrada no conversor de potência para ser assim comparada com a velocidade de referência de modo a que esta seja ajustada e o erro diminua.

Na Figura 4.6 é apresentado o esquema referente à cadeia fechada realizada:

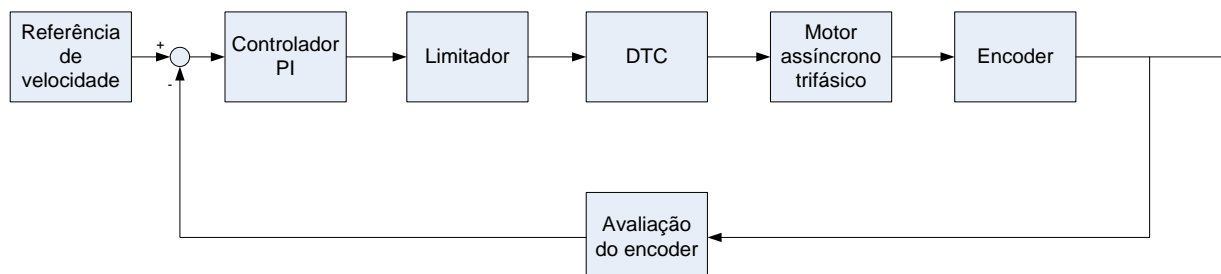


Figura 4.6 - Esquema de controlo em cadeia fechada utilizado no conversor de potência

Os principais parâmetros necessários ao funcionamento pretendido quer para o controlo de velocidade quer para o controlo de binário são apresentados no setor 4.2.1.

4.1.3 – Motor assíncrono trifásico

Para a realização da emulação são utilizados dois motores assíncronos trifásicos alimentados por intermédio de dois conversores de potência. Pretende-se com isto, utilizar um dos motores como emulação de uma carga elétrica e o outro como emulação do MD.

O motor encarregue da emulação de carga elétrica é parametrizado para controlo de binário, isto é, o binário que este irá produzir no veio será visto como um binário de carga aplicado ao MD conseguindo-se desta forma o mesmo efeito que o acoplamento de uma carga elétrica os terminais do gerador síncrono do grupo, com as perdas no gerador síncrono.

Por sua vez com o outro motor, pretende-se emular o comportamento do MD na medida em que para um determinado binário de carga no veio, este responde de forma idêntica quer em regime permanente quer em regime dinâmico ao MD do GGD. O motor assíncrono trifásico em questão é controlado em velocidade.

As características mecânicas e elétricas dos motores assíncronos trifásicos são apresentadas na Tabela 4.3 de acordo com a sua chapa de características:

Tabela 4.3 - Características dos motores assíncronos trifásicos

| | Motor assíncrono trifásico | |
|----------------------|----------------------------|--------------------------|
| | Controlado em binário | Controlado em velocidade |
| $P_n (W)$ | 1400 | 1380 |
| $n_n (rpm)$ | 1500 | 1500 |
| $I_{n \Delta-Y} (A)$ | 6,1 - 3,5 | 6,8 - 3,9 |
| $U_{n \Delta-Y} (V)$ | 220 - 380 | 400 |

Posto isto, é de referir que é no motor com controlo em velocidade que o *encoder* se encontra acoplado ao veio.

Importa igualmente salientar, que os dois motores encontram-se ligados fisicamente entre si através de um acoplamento direto entre os veios.

4.2 – Sistema de emulação do motor Diesel

O sistema de emulação do MD consiste na bancada de ensaios, composta pelos elementos descritos em 4.1. Os elementos descritos constituem o sistema físico sob o qual se pretende realizar a emulação do MD. De forma a permitir o funcionamento dos elementos descritos é importante caracterizar a implementação dos controlos de velocidade e binário nos conversores de potência a fim de se obter o fim pretendido para os motores assíncronos utilizados.

4.2.1 – Bancada de ensaios

Apresentados os processos e os equipamentos que constituem a base para a emulação, é possível construir o sistema de emulação do MD. O sistema de emulação do MD, tem como base a característica de velocidade em regime permanente e dinâmico obtida através dos ensaios realizados ao MD, bem como nos equipamentos que a suportam e permitem o processo de emulação. A construção da bancada de ensaios é o culminar do sistema de emulação, que

permite a validação dos resultados obtidos. Na Figura 4.7, está presente a implementação dos motores assíncronos trifásicos acoplados com uma união de veios.

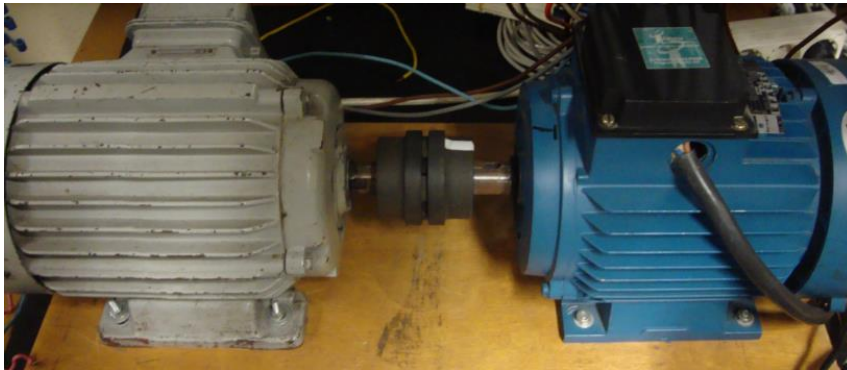


Figura 4.7 – Motores assíncronos trifásicos da bancada de ensaios

Na Figura 4.8, está presente a implementação dos conversores de potência ACS 600, que permitem o controlo dos motores assíncronos utilizados para a emulação, bem como a consola de comando CDP 312 que permite o controlo local dos conversores de potência. Os conversores de potência presentes na Figura 4.8 possuem comunicação entre si através de fibra ótica.

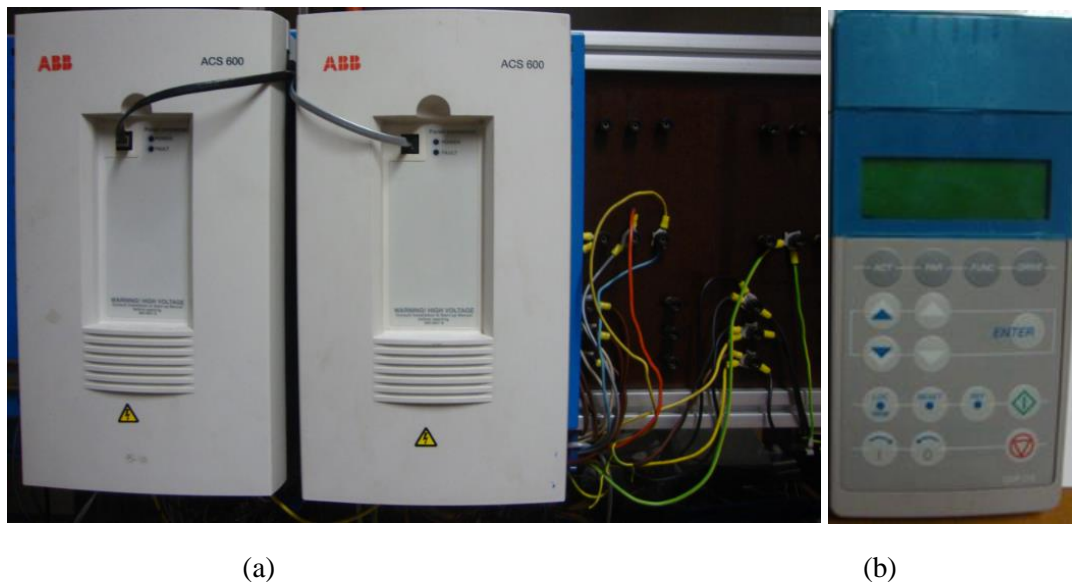


Figura 4.8 – (a) Conversores de potência ACS 600, (b) Consola de comando CDP 312

Na Figura 4.9, está presente o módulo NMBA-01, que permite a conversão das mensagens enviadas a partir de comunicação série oriunda do computador por protocolo Modbus,

permitindo também a conversão de mensagens em sentido inverso. Está também presente o módulo NPCU-01, que faz a conversão da comunicação série entre porta RS-232 proveniente do computador e RS-485 oriunda do módulo NMBA-01.



Figura 4.9 – (a) Módulo de conversão NMBA-01, (b) Módulo de conversão NPCU-01

É utilizado um computador convencional para a implementação do programa de comunicação e controlo em LabView 6.1, e que permite a interface com o utilizador. O computador funciona como *master* da rede de comunicação com os *slaves*, os conversores de potência.

4.2.2 - Implementação dos controlos de velocidade e de binário dos motores assíncronos

Sendo que cada um dos motores utilizados possui funções distintas, é necessário um controlo igualmente distinto. Relativamente ao motor controlado em velocidade, que é o que tem a função de emular o MD este tem algumas particularidades para este tipo de controlo, diferentes do motor controlado em binário. Para controlar o motor em velocidade, é necessário parametrizar para o efeito o conversor de potência que está a cargo deste bem como, o conversor de potência a cargo do motor controlado em binário. A parametrização de ambos os conversores de potência, encontra-se apresentada na Tabela I.5, presente no Anexo I.5.

Como é patente na Tabela I.5, os conversores de potência permitem a parametrização dos mesmos de acordo com a função de controlo desejada. Quaisquer umas das funções escolhidas baseiam-se no método de controlo DTC, apresentado no setor 2.3.2. Os valores referentes ao controlador PI, foram obtidos de forma automática (ensaios de auto-comissionamento) através de uma função existente nos conversores que permite determinar todas as características elétricas de cada máquina, adaptando assim os parâmetros de controlo.

4.3 – Implementação do protocolo de comunicação série nos conversores de potência

Feita a parametrização do conversor de potência para o controlo de velocidade e binário, é encetada então a comunicação com conversor de potência através do protocolo Modbus com o modo de transmissão RTU, que utiliza o RS-232 e o RS-485 como meios físicos de transmissão. A comunicação através do protocolo referido é feita com uma troca de mensagens em numeração hexadecimal, onde se baseia na técnica de mestre-escravo. Este tipo de técnica permite a um dispositivo (*master*) controlar os restantes (*slaves*) e estes respondem de acordo o comando do mestre. Numa comunicação entre mestre e escravo existe uma mensagem de comando para o escravo e uma mensagem de resposta para o mestre.

O modo de transmissão série utilizado, define cada bit da mensagem transmitida, bem como o modo como a informação da mensagem é compactada ou descompactada. Este modo de transmissão, igualmente com outros parâmetros de comunicação utilizando a porta série, é selecionado e parametrizado quer nos conversores de potência (*slaves*) quer no computador utilizado (*master*) para que a comunicação seja possível. Os outros parâmetros dizem respeito ao *baud rate*, bit de paridade e endereços.

Para que a comunicação seja um sucesso, é necessário que os parâmetros relativos ao *baud rate* e paridade sejam iguais no conjunto, sendo escolhidos os valores apresentados na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Parâmetros escolhidos para estabelecimento de comunicação série

| | |
|-----------|-------------|
| Baud rate | 19200 bit/s |
| Paridade | Impar |

Cada mensagem de comando ou resposta possui um endereço, ou seja, a cada escravo é definida uma morada e esta morada identifica o destino a que é endereçada determinada mensagem ou a sua origem.

Assim, foi atribuído um endereço a cada conversor de potência utilizado, como se verifica na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Endereçamento dos conversores de potência

| Conversores de potência | Endereço |
|--------------------------|----------|
| Controlado em velocidade | 1 |
| Controlado em binário | 2 |

Com os parâmetros necessários à transmissão de mensagens definidos é possível estabelecer-se comunicação entre *master-slave*.

A mensagem no modo RTU é genericamente composta pela forma representada na Figura 4.10.

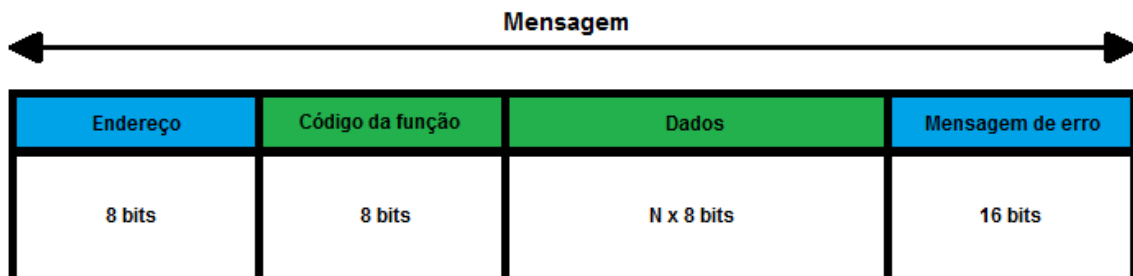


Figura 4.10 - Estrutura de mensagem Modbus RTU

No primeiro campo é introduzido o endereço do *slave* que se pretende comunicar, o código da função é variável consoante o que é pretendido, no presente estudo este código apenas se cinge a ler e escrever nomeadamente com a numeração 03 e 06 respetivamente. Com o código da função, define-se para o caso em estudo o parâmetro que se pretende aceder do ACS600 onde o conjunto seguinte é relativo ao valor da mensagem. Por último é dado espaço à mensagem de erro, que não é tida em consideração neste trabalho.

Seja qual for a código da mensagem utilizado, ou seja, para ler ou escrever existe sempre uma mensagem de comando e uma mensagem de resposta, onde para se confirmar se a comunicação

foi realizada com sucesso basta verificar se as duas mensagens são idênticas. Se as mensagens forem iguais a comunicação foi realizada com sucesso.

Para a implementação deste protocolo utilizou-se a interface do LabView 6.1, onde foram utilizados subprogramas com o objetivo de possibilitar a comunicação entre os elementos físicos de *hardware* utilizados, de modo a que exista capacidade de trocar mensagens de comando e resposta.

A partir das mensagens trocadas é possível monitorizar e comandar o comportamento dos motores e proceder à emulação desejada.

Para a leitura de parâmetros é utilizado o subprograma “Ler” com a finalidade de obter as mensagens enviadas pelos *slaves*, e de a fazer a leitura dos parâmetros dos ACS. Isto permite monitorizar em tempo real qualquer tipo de parâmetro desejado, o que neste trabalho será a velocidade e o binário. Este subprograma é representado no programa global com o bloco 03, visto que é o código da função utilizado para a leitura.

Para o envio de parâmetros é utilizado o subprograma “Escrever” para escrever nos parâmetros dos ACS, como é o caso da velocidade e do binário que são as grandezas que se pretendem controlar. Este subprograma é representado no programa global com o bloco 06, dado que é o código da função utilizado para a escrita.

Os blocos de leitura e escrita são então integrados nos blocos de programas construídos para a emulação do MCI.

4.4 – Programa de comando e monitorização do sistema de emulação

Possuindo a base de comunicação que suporta o envio e a receção de informação entre o LabView 6.1 e os conversores de potência, é então possível construir o programa que suporta todo o sistema de emulação, o que permite aplicar as caracterizações das respostas do MD.

Com a modelação matemática criada, importa definir a arquitetura desejada para o programa, de forma a que este funcione para os diversos regimes caracterizados. Posto isto, o programa de comando e monitorização assenta numa caracterização de respostas de velocidade em função das condições que o utilizador pretenda emular o MD. As condições transpostas para o programa, baseiam-se em intervalos de velocidade e binário obtidos a partir dos ensaios realizados ao MD,

com a possibilidade de caracterizar as situações no que respeita a arranque e paragem em vazio, à plena carga ou em regime permanente com a colocação e deslastre de escalões de carga.

Como o programa de emulação é construído em função dos ensaios realizados ao MD, implica assim que além da caracterização das respostas obtidas, é necessário caracterizar as respostas para diferentes velocidades e binários de carga. Este processo é construído com base numa aproximação realizada, que se estima que possa ocorrer em determinado intervalo onde cada ensaio se insere.

A aproximação realizada foi conseguida através da análise das respostas de velocidade obtidas para os diferentes regimes, ou seja, para uma determinada velocidade e binário obtido é definido que a resposta de o sistema é a mesma para velocidades e binários diferentes num determinado intervalo. Em seguida é apresentada a situação criada para descrever o ensaio de arranque à plena carga.

Para o ensaio à plena carga, existem 3 condições criadas que são acionadas consoante as características de funcionamento que o utilizador pretenda emular. Desta forma, no que respeita à velocidade de funcionamento, existem 3 condições onde dependendo da velocidade que o utilizador escolha regular o MD será acionada uma das condições. O mesmo sucede para as condições de binário de carga desejado. Na Tabela 4.6 está presente os intervalos de velocidades e binários construídos para a situação de arranque à plena carga, onde se admite que as respostas sejam semelhantes às obtidas nos três ensaios realizados ao MD para esta situação, conforme apresentados no setor 3.3.1 e caracterizados em 3.3.2.

Tabela 4.6 – Tabela de condições características para ensaio de arranque a plena carga

| | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Velocidade [rpm] | [1400;1450] | [1450;1900] | [1900;2400] |
| Binário [Nm] | [140;148] | [130;143] | [90;130] |

Cada condição existente compreende uma equação de segunda ordem construída aquando da caracterização das respostas de velocidade do MD. Assim, de acordo com os valores de velocidade e binário escolhidos pelo utilizador, a equação descreverá a mesma resposta dinâmica de velocidade que a obtida e caracterizada do MD.

No programa construído, as equações de segunda ordem encontram-se com as variáveis adaptadas por forma a receberem as condições de velocidades de referência, variação de sinais, tempo, entre outras variáveis de controlo. A equação de segunda ordem, tal como apresentada no setor 3.3.2 é descrita em função do tempo, variável esta que no programa contruido toma a forma de um número incrementado à unidade por cada ciclo *for* concluído. Este ciclo *for* caracteriza-se tal como na programação por código (ex. Visual Basic) numa função que processa os elementos nela incluída, enquanto se verificar uma determinada condição, que no caso prático deste trabalho diz respeito à ordem de inicio e paragem de processamento do programa no LabView 6.1. Na Figura 4.11, é patente um exemplo da função utilizada, com os elementos incluídos que se pretende que sejam processados.

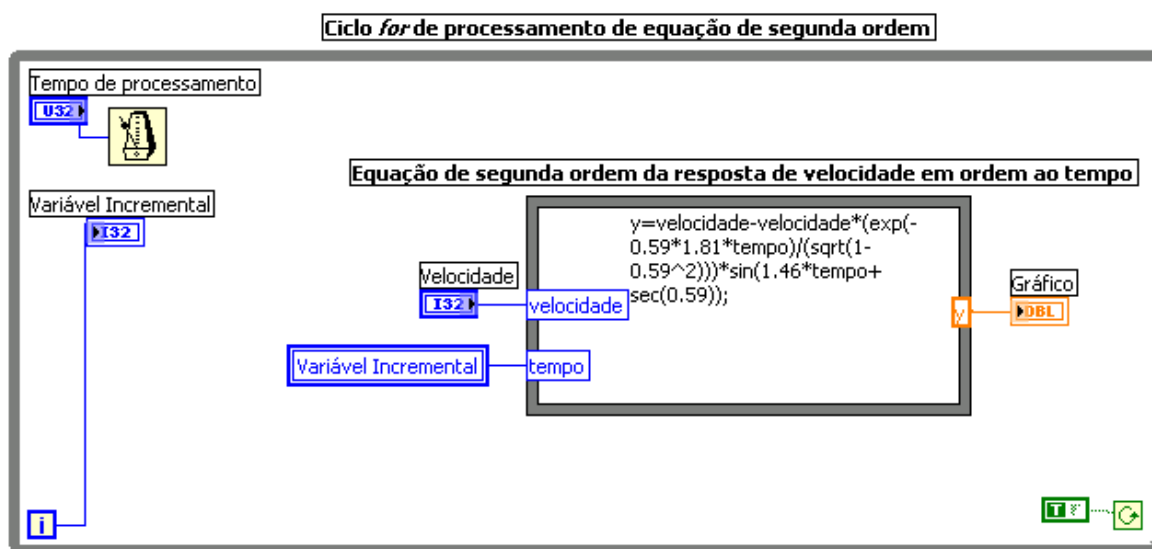


Figura 4.11 – Exemplo do ciclo da função *for* utilizada para o processamento do programa de emulação

Na Figura 4.11, está presente o ciclo *for* que é processado a uma velocidade definida pelo utilizador. A velocidade de cada ciclo processado é limitada pela capacidade de processamento do computador ou então dos processos incluídos na função. Como um dos processos incluídos diz respeito ao envio e receção de mensagens a partir do protocolo Modbus, a velocidade de cada ciclo *for* é limitada também pela velocidade de comunicação série utilizada entre o computador e conversores de potência para partilha de informação. Este fator limita inevitavelmente o ciclo de processamento mesmo por mais rápido que o utilizador pretenda que este ciclo seja concluído. No setor 4.5 com a apresentação de resultados é aferida a influência real desta limitação no

processo de emulação. Definidos os pontos-chave onde assenta a arquitetura do programa de emulação, é apresentado assim na Figura 4.12 o diagrama funcional do programa.

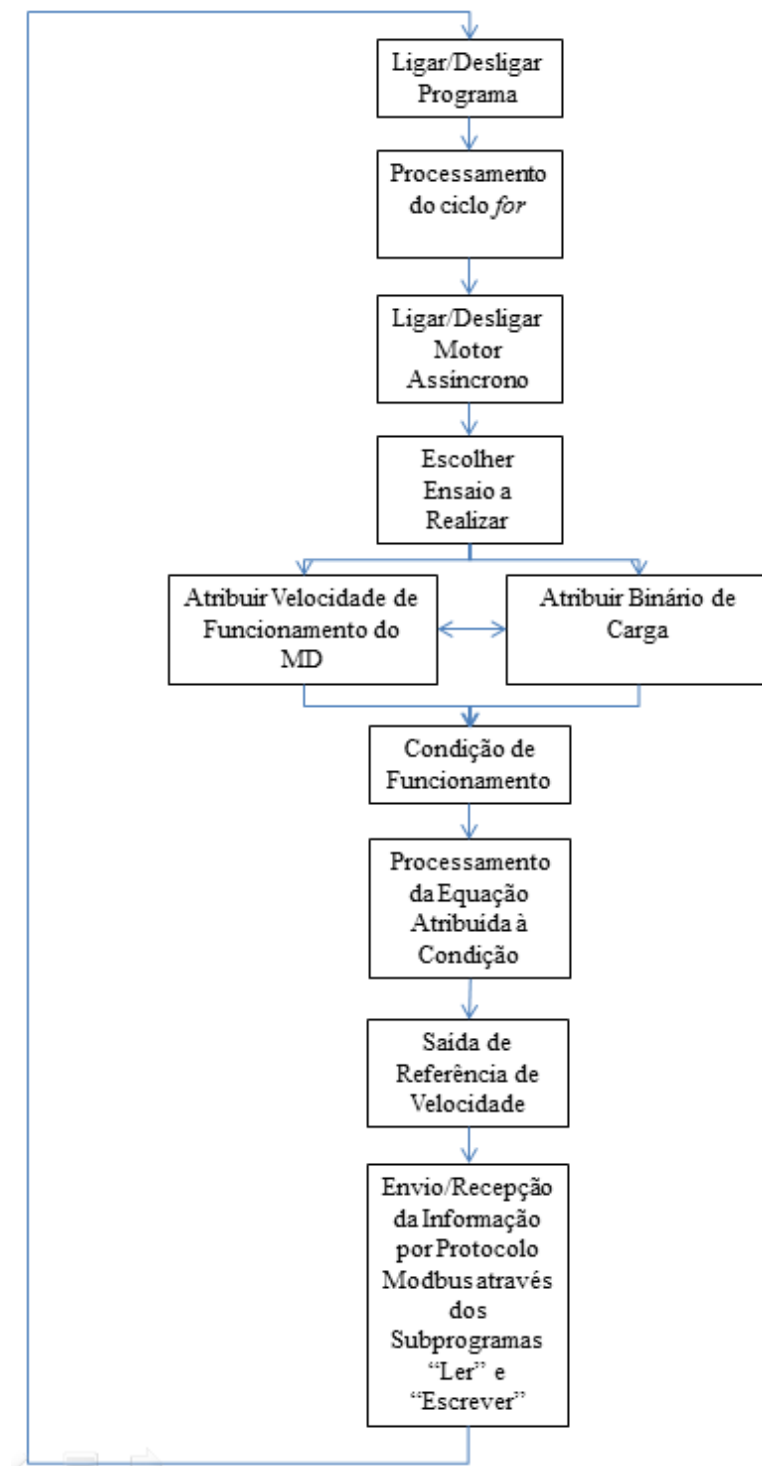


Figura 4.12 – Diagrama funcional do programa de emulação construído em LabView 6.1

A Figura 4.12, apresenta a arquitetura sob a qual funciona o programa de emulação em ambiente de LabView 6.1. O processamento do ciclo, tem em conta as variações de velocidade e binário exigidas pelo utilizador, em que em cada ciclo processado existe uma comparação com o estado anterior de forma a aferir se o utilizador alterou as condições de funcionamento. Em caso afirmativo, o processo de incrementação da variável tempo recomeça, dando origem a uma nova resposta dinâmica para uma diferente condição. Toda esta variação de condições é possível para o utilizador graças a um ambiente gráfico construído que permite uma interface fora do ambiente da programação base. Na Figura 4.13, é assim apresentada a interface criada de forma a que o utilizador possua os elementos necessários para proceder ao controlo dos parâmetros que permitem descrever a resposta de velocidade do MD.

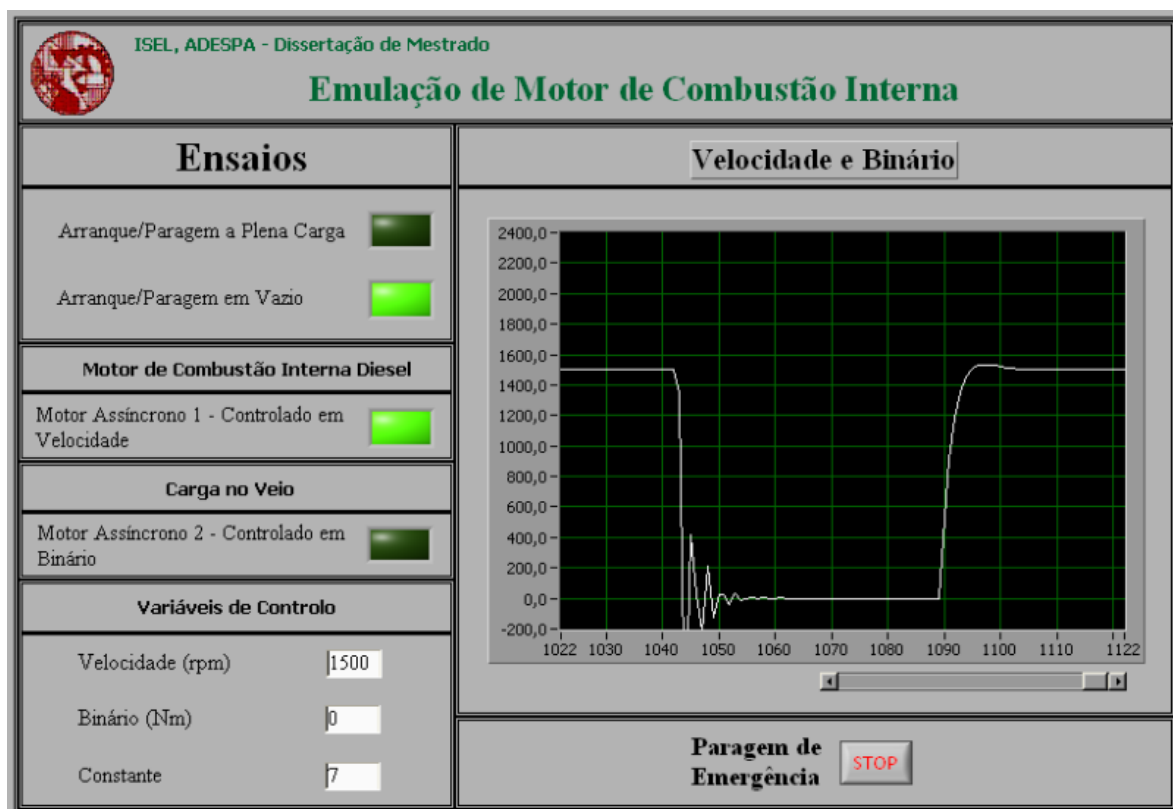


Figura 4.13 – Interface do Programa de Emulação do MD, construído em LabView 6.1

Como é visível na Figura 4.13 da interface do programa de emulação, é possível ao utilizador verificar a velocidade de referência enviada para os conversores de potência. A velocidade real obtida a partir do *encoder* não é lida na respetiva interface dado que a largura de banda da comunicação série é baixa, nomeadamente 19200bit/s, o que limitaria ainda mais o processamento do ciclo. Tal experiência foi realizada, optando-se assim por não se proceder à

leitura da velocidade real por intermédio da comunicação série. Desta feita, considerou-se assim que a leitura da velocidade real obtida pelo seria realizada através de um osciloscópio ligado a uma saída analógica do conversor de potência controlado em velocidade, saída esta que foi parametrizada de forma a permitir a leitura da velocidade lida pelo *encoder*.

4.5 – Validação experimental do sistema de emulação

Possuindo a bancada de ensaios que constitui o sistema de emulação construído e estando concluído o programa que permite realizar a emulação da resposta de velocidade do MD em regime dinâmico e permanente, procedeu-se então à realização dos ensaios para validação do modelo matemático desenvolvido. Na Figura 4.14 é representada a bancada de ensaios já na situação de emulação, com todos os elementos físicos utilizados e já descritos no capítulo 4.

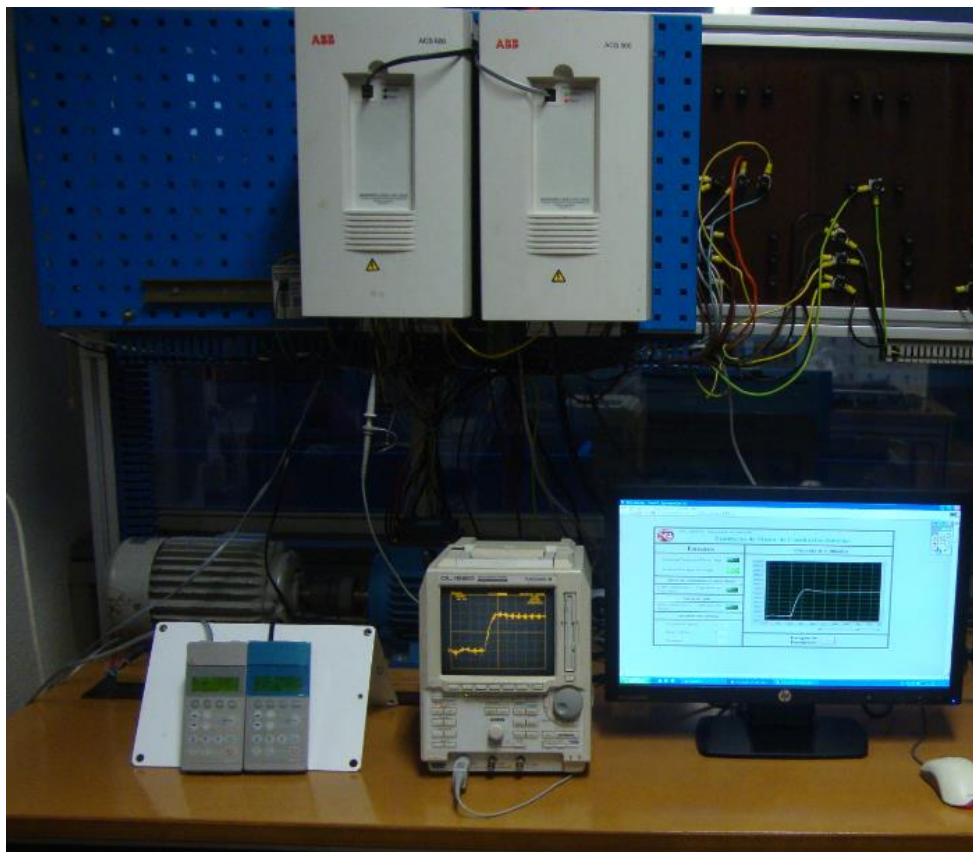


Figura 4.14 – Bancada de ensaios constituinte do sistema de emulação

A bancada de ensaios apresentada na Figura 4.14 representa o culminar da realização do presente trabalho, pois permite a concretização do objetivo principal, o da emulação de um MD a partir de uma máquina assíncrona com todos os componentes imprescindíveis ao seu controlo.

Com as infraestruturas construídas, importa então contextualizar e validar os ensaios do sistema de emulação. Assim, foi determinado que os ensaios realizados fossem sob as mesmas condições de velocidade e binário em que foram realizados os ensaios ao MD. Desta forma, foi então testado o funcionamento do conjunto do sistema de emulação para as diferentes situações de ensaios, quer em vazio quer em carga.

Para os ensaios em carga constatou-se que com a colocação em funcionamento do motor assíncrono controlado em binário para qualquer binário de carga, a resposta de velocidade do motor assíncrono controlado em velocidade em regime dinâmico, resulta numa resposta com uma evolução diferente da desejada. Esta situação ocorre devida à produção por parte motor assíncrono controlado em velocidade, de um binário de aceleração em situações de variação da referência de velocidade que é enviada por comunicação série. O que no caso do motor assíncrono controlado em binário, que também possui um binário igualmente enviado como referência através de comunicação série, faz com que não exista o sincronismo de mensagens enviadas para cada um dos conversores de potência de modo a que para os binários de aceleração de ambos os motores assíncronos sejam simultâneos e se anulem entre si. Esta sincronização de mensagens enviadas para ambos os conversores de potência não é possível dada a limitação existente na largura de banda da comunicação série suportada pelo módulo NMBA-01 da ABB, nomeadamente de 19200bit/s, o que para além de ser um fator limitativo no processamento do programa de emulação e atrasar o tempo das respostas de velocidade, limita também o envio de mensagens em simultâneo para ambos os conversores, o que provoca uma resposta independente e isolada para cada conversor de potência. Posto isto, com a impossibilidade de uma caracterização da carga no veio do MD através do acionamento do motor assíncrono controlado em binário, foi optado por não se representar de uma forma física a mesma. Assim, o motor assíncrono controlado em binário permaneceu sem ação para a realização dos ensaios, o que representa uma limitação para este trabalho. Com isto, o utilizador continua a poder emular a resposta de velocidade do MD para diferentes condições de velocidade e binário, mas sem que este último parâmetro seja mensurável e visível através do funcionamento do motor assíncrono controlado em binário.

Para a realização dos ensaios, optou-se como método preferencial para o registo da velocidade do motor controlado em velocidade, o uso de um osciloscópio digital, com uma ponta de prova ligada à saída analógica do conversor de potência. O uso de um osciloscópio digital, permite uma melhor base de comparação dos resultados obtidos do sistema de emulação com os resultados obtidos dos ensaios ao MD. Assim, foi parametrizada a saída analógica do conversor de potência com amplitude máxima de tensão de 10V em CC, para que esta expresse a velocidade atual do motor assíncrono controlado em velocidade e com uma resolução de leitura que irá variar consoante os ensaios realizados, de modo a permitir uma melhor perceção na leitura e comparação de resultados. Esta parametrização é realizada a partir da consola de comando, CDP 312, dos conversores de potência de acordo com a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parametrização da saída analógica do conversor de potência controlado em velocidade

| Saída analógica | |
|-----------------|------------------|
| Parâmetro | Característica |
| 12 | Velocidade Atual |

Esta parametrização permite obter na saída analógica, a velocidade em tempo real lida pelo *encoder* colocado no veio do motor assíncrono controlado em velocidade.

A emulação é composta por duas partes à semelhança dos ensaios realizados ao MD, nomeadamente a emulação para situações de arranque e paragem bem como a emulação de situações de colocação e deslastre de cargas. Estas funcionam em conjunto, constituindo a resposta aproximada ao sistema real para cada carga ou variação de carga que o utilizador impõe ao GGD e consequentemente no MD.

Com isto, para validação de resultados, a realização dos ensaios foi feita de acordo com os ensaios realizados ao MD, a figurarem assim os ensaios de arranque e paragem em vazio à plena carga e os ensaios de colocação e deslastre de cargas a velocidade constante.

4.5.1 – Ensaios de arranque e paragem em vazio e em carga

Ensaios de Arranque e Paragem à em Vazio:

Os ensaios de arranque e paragem em vazio, consistem tal como os que foram realizados ao MD, na emulação da resposta de velocidade do MD a situações de arranque e paragem sem qualquer carga colocada.

O procedimento para os ensaios de arranque e paragem em vazio, consiste em regular inicialmente uma velocidade de funcionamento que se pretenda que o motor assíncrono funcione em regime permanente, procedendo-se de em seguida ao arranque do mesmo. Este terá uma resposta dinâmica oscilatória, característica de um sistema de segunda ordem, tal como foi descrita e analisada a resposta de velocidade no sistema real do MD. Concluído o regime dinâmico da resposta de velocidade, o sistema entra em regime permanente, em que a velocidade do motor assíncrono estabiliza. Após o sistema estar no funcionamento em regime permanente é então dada a ordem de paragem do sistema, observando-se novamente um regime dinâmico na resposta do mesmo.

A uma velocidade de funcionamento regulada para 1500rpm, obteve-se a seguinte resposta do sistema de emulação, apresentada na Figura 4.15:

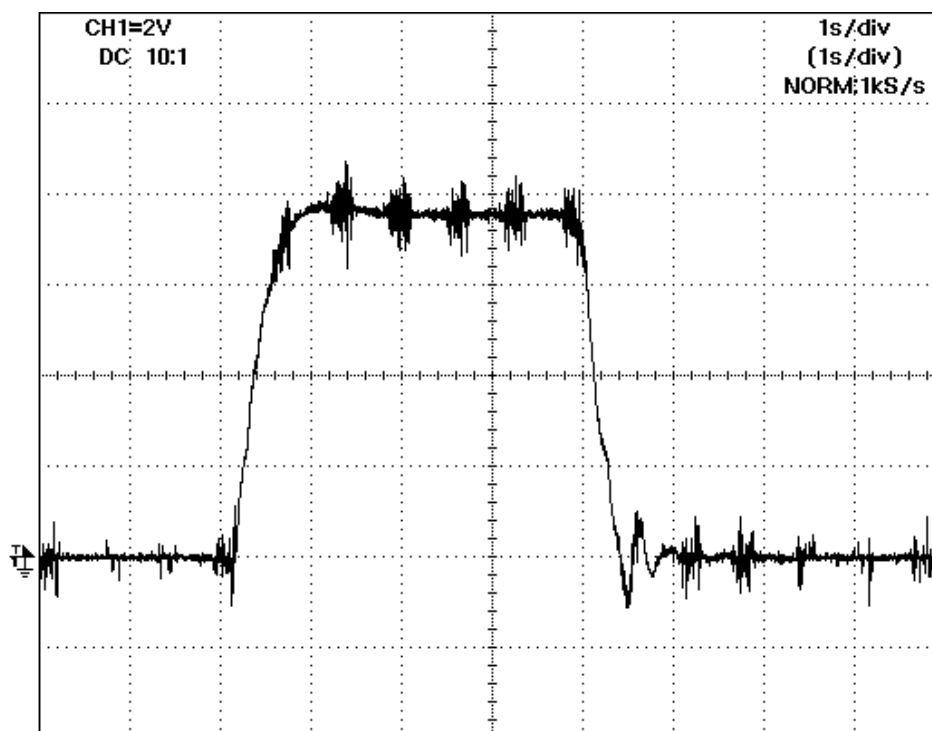


Figura 4.15 – Resposta de velocidade do sistema de emulação a ensaio de arranque e paragem em vazio a 1500rpm

Para efeitos de comparação e análise do sistema, consideram-se como dados indicativos, os parâmetros de caracterização de um sistema de segunda ordem, apresentados no setor 3.3.2. Desta forma, são comparados os parâmetros obtidos e usados aquando da caracterização da resposta de velocidade do MD para o ensaio correspondente, de forma a validar a resposta emulada. Os parâmetros referem-se assim a, t_r , t_p , t_d , $y(t_p)$, $y(\infty)$, M_p , δ , ω_o e ω_a . A fim de se obterem os parâmetros referidos, é realizada a análise à Figura 4.15 na situação de arranque e paragem, sendo estes alvos de comparação e validação com os obtidos no setor 3.3.2 com os referentes à Figura 3.28.

Assim, na Tabela 4.8 encontram-se os parâmetros obtidos com a análise à resposta do sistema de emulação, aquando da situação de arranque em vazio.

Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos na situação de arranque em vazio a 1500rpm

| Parâmetros | Ensaio ao sistema de Emulação | Ensaio ao sistema real do MD | Erro relativo [%] |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|
| t_r [s] | 0,65 | 0,60 | -8,33 |
| t_p [s] | 0,92 | 0,82 | -12,20 |
| t_d [s] | 0,50 | 0,46 | -8,70 |
| $y(t_p)$ [rpm] | 1564 | 1564 | 0 |
| $y(\infty)$ [rpm] | 1500 | 1500 | 0 |
| M_p [%] | 4,27 | 4,27 | 0 |
| δ | 0,70 | 0,70 | 0 |
| ω_o [Hz] | 4,78 | 5,36 | 10,82 |
| ω_a [Hz] | 3,41 | 3,83 | 10,97 |

A Tabela 4.8 apresenta para além dos resultados obtidos pela análise à resposta do sistema de emulação, os resultados obtidos pelo sistema do MD. Através dos resultados obtidos e do erro relativo calculado, é possível concluir que os parâmetros dos valores de pico, de regime permanente, de sobrelevação e constante de amortecimento são idênticos, excetuando os tempos

de crescimento, pico e atraso e consequentes frequências de onda, não tendo contudo um erro relativo elevado. Tal variação dos tempos que caracterizam a forma de onda obtida, são justificados pela velocidade de comunicação, que não é suficiente para descrever todos os pontos da forma de onda resultantes do processamento da equação característica. A velocidade de comunicação o que resulta numa limitação ao trabalho de emulação desenvolvido.

Como a velocidade de comunicação é um fator limitativo na resposta e como não é possível alterar sem que sejam substituídos os meios físicos, pode-se afetar a construção da forma de onda através do número de pontos que a descrevem. O programa de emulação foi então construído para que este parâmetro possa ser alterado. Assim, para a construção da forma de onda é necessária a parametrização do número de amostras com as quais se deseja construir a mesma, o que afeta diretamente a equação de segunda ordem que define a resposta. Isto por sua vez, tem influência na onda que é obtida e observada. Com a diminuição do número de pontos que definem a onda, estando a velocidade de comunicação no seu limite, permite que se obtenha uma resposta da onda mais rápida, contudo recaísse numa situação em que a resposta obtida deixa de ser perceptível não havendo por sua vez uma base comparativa para com a resposta do MD. Este número de pontos que define a forma de onda, são aplicados na equação que descreve a resposta de segunda ordem, como um fator multiplicativo no tempo. Em (3.14) é apresentada a equação de caracterização do sistema de segunda ordem, baseada em (3.9), com a qual resultam as respostas do sistema de emulação, onde está patente a constante p , em que $p \in N$.

$$y(t) = 1(t) - \frac{e^{-\delta\omega_0(p \times t)}}{\sqrt{1-\delta^2}} \times \text{sen}[\omega_a(p \times t) + \cos^{-1}(\delta)] \quad (3.14)$$

Pelo facto de a velocidade de comunicação se encontrar limitada, esta influência diretamente o instante de tempo, t , parâmetro este que é incrementado unitariamente por cada ciclo de simulação do programa de emulação completado. Inicialmente, estando (3.9) apenas dependente de t , a resposta daí resultante possui uma resolução elevada, no entanto a resposta obtida quando o sistema de emulação é colocado em funcionamento é lenta. Com isto, é imperativo que seja encontrado um compromisso entre o número de pontos, a velocidade da resposta e a percepção da onda obtida. Desta forma, foi incrementado o parâmetro definido por p , que o utilizador coloca de forma a obter com um menor número de pontos, uma forma de onda o mais aproximada possível da real e com maior velocidade de resposta. Assim, as respostas obtidas pelo sistema de emulação são construídas sob esta base, o que resulta em respostas com algumas divergências quando comparadas às respostas obtidas pelo sistema do MD.

Para a resposta do sistema para a situação de paragem obtiveram-se os parâmetros, apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parâmetros obtidos na situação de paragem em vazio a 1500rpm

| Parâmetros | Ensaio ao sistema de Emulação | Ensaio ao sistema real do MD | Erro relativo [%] |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|
| t_r [s] | 0,40 | 0,56 | 28,57 |
| t_p [s] | 0,70 | 0,90 | 22,22 |
| t_d [s] | 0,30 | 0,36 | 16,67 |
| $y(t_p)$ [rpm] | 181,2 | 181,2 | 0 |
| $y(\infty)$ [rpm] | 0 | 0 | 0 |
| M_p [%] | 12,08 | 12,08 | 0 |
| δ | 0,55 | 0,55 | 0 |
| ω_o [Hz] | 5,37 | 4,18 | -28,47 |
| ω_a [Hz] | 4,49 | 3,49 | -28,65 |

Neste ensaio verifica-se, que com o número de amostras definidas para descrever a onda já foram suficientes para que o tempo de pico da onda seja inferior ao tempo de pico obtido no ensaio ao MD. Isto deve-se ao facto de que para a frequência e para a constante de amortecimento que descreve a onda do MD, é possível que com o número de amostras definidas para o ensaio de arranque e paragem se obtenha a forma de onda pretendida para a limitação existente na velocidade de comunicação. Neste caso, a limitação da velocidade de comunicação não é determinante para a validação dos resultados obtidos, onde é possível ajustar o número de amostras que descrevem a onda para que os tempos de pico e estabelecimento sejam similares aos do sistema físico do MD. Conclui-se que para este ensaio de paragem em vazio, é possível regular o número de amostras que define a forma de onda e assim obter uma onda idêntica à registada aquando do ensaio ao MD. Apesar disto o erro relativo obtido é elevado, pelo que se pode justificar pela aproximação da resposta do sistema a um sistema de segunda ordem, o que

suscita por si só uma incrementação do erro, somando a isto o facto de o ruído da onda obtida dificultar a precisão nas leituras dos resultados.

Ensaio de Arranque e Paragem à Plena Carga:

Os ensaios de arranque e paragem à plena carga, consistem tal como os que foram realizados ao MD, na emulação da resposta de velocidade do MD a situações de arranque e paragem com o escalão máximo de carga, de acordo com a Tabela 3.5, do setor 3.3.2.

O procedimento para os ensaios de arranque e paragem à plena carga no sistema de emulação, consiste em regular inicialmente uma velocidade de funcionamento que se pretenda que o motor assíncrono funcione em regime permanente em vazio, procedendo-se de seguida ao arranque do mesmo, com a adição do escalão de carga máximo para aquela velocidade. Este terá uma resposta dinâmica oscilatória, característica de um sistema de segunda ordem, tal como foi descrita a resposta de velocidade no sistema do MD. Concluído o regime dinâmico da resposta de velocidade, o sistema entra em regime permanente em que a velocidade do motor assíncrono estabiliza. Após o sistema estar no funcionamento em regime permanente, é então dada a ordem de paragem do sistema, observando-se novamente um regime dinâmico na resposta do mesmo.

A uma velocidade de funcionamento em vazio regulada para 1500rpm com posterior arranque com uma carga equivalente à carga máxima para a mesma velocidade, obteve-se a seguinte resposta do sistema de emulação para o ensaio de arranque e paragem à plena carga, como é apresentado na Figura 4.15.

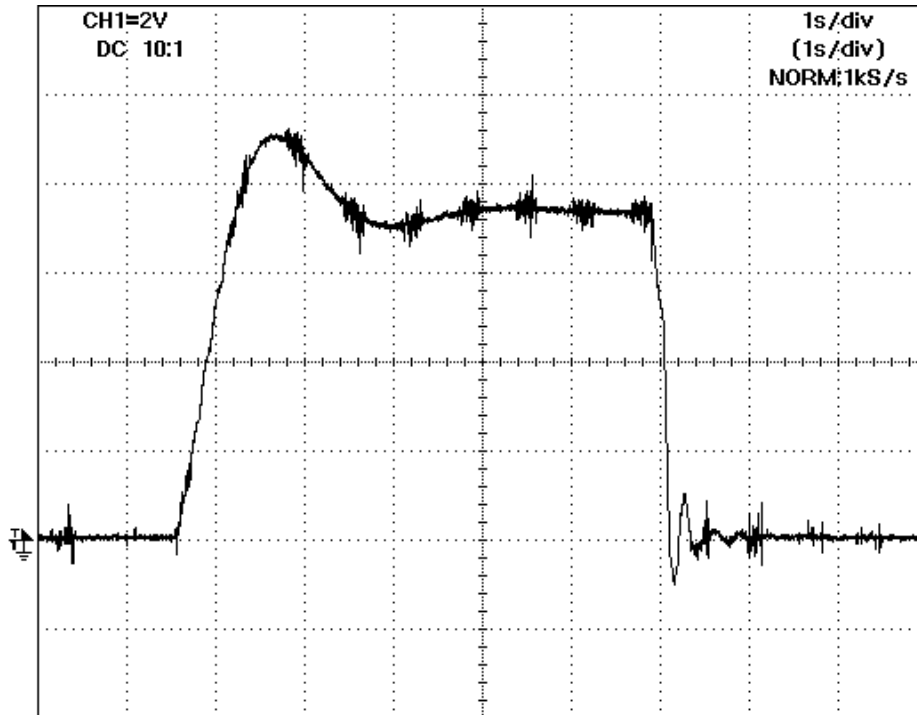


Figura 4.16 - Resposta de velocidade do sistema de emulação a ensaio de arranque e paragem à plena carga com regulação em vazio a 1500rpm

O ensaio de arranque e paragem à plena carga com a resposta apresentada na Figura 4.16, quando comparada à resposta obtida pelo ensaio ao MD (Figura I.6), apresenta diferenças ao nível da forma de onda na situação de arranque, na medida em que a resposta do sistema de emulação resulta de uma aproximação das respostas de velocidade do sistema do MD a um sistema de segunda ordem. Tal aproximação resulta numa caracterização do sistema menos idêntica, como é confirmado de uma forma mais pronunciada pelo resultado obtido na Figura 4.16. No entanto mesmo com as resposta distintas na sua forma de onda, são comparados os parâmetros que caracterizam as respostas como sistemas de segunda ordem.

Para a situação de arranque, apresenta-se na Tabela 4.9 os resultados dos parâmetros analisados.

Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos do ensaio de arranque à plena carga a 1500rpm

| Parâmetros | Ensaio ao sistema de Emulação | Ensaio ao sistema real do MD | Erro relativo [%] |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|
| t_r [s] | 0,52 | 0,48 | -8,33 |
| t_p [s] | 1,15 | 0,95 | -21,05 |
| t_d [s] | 0,40 | 0,40 | 0 |
| $y(t_p)$ [rpm] | 1784 | 1784 | 0 |
| $y(\infty)$ [rpm] | 1440 | 1440 | 0 |
| M_p [%] | 23,89 | 23,89 | 0 |
| δ | 0,45 | 0,45 | 0 |
| ω_o [Hz] | 3,06 | 3,70 | 17,30 |
| ω_a [Hz] | 2,73 | 3,31 | 17,52 |

Os resultados obtidos, conforme apresentado na Tabela 4.9, possuem as mesmas características que as restantes respostas já analisadas excetuando nas situações de paragem do sistema de emulação, na medida em que apresentam valores de velocidade de pico e em regime permanente, bem como de sobrelevação relativa e de constante de amortecimento idênticos às obtidas com a análise das respostas do MD. No que se refere aos parâmetros dos tempos de crescimento, pico e consequentes frequências o sistema apresenta valores divergentes e com erros relativos elevados. Isto deve-se à parametrização dos pontos que descrevem a forma de onda que são admitidos em função da sua perceção e caracterização, dada a limitação da velocidade de comunicação existente, mas também se deve da precisão das leituras dos resultados obtidos não ser a mais elevada dadas as dificuldades que o ruído apresenta na análise à forma de onda.

Através da análise da resposta do sistema para a situação de paragem obtiveram-se os parâmetros, apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos na situação de paragem à plena carga a 1500rpm

| Parâmetros | Ensaio ao sistema de Emulação | Ensaio ao sistema real do MD | Erro relativo [%] |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|
| t_r [s] | 0,18 | 0,75 | 76 |
| t_p [s] | 0,30 | 0,85 | 64,71 |
| t_d [s] | 0,22 | 0,35 | 37,14 |
| $y(t_p)$ [rpm] | 181 | 181 | 0 |
| $y(\infty)$ [rpm] | 0 | 0 | 0 |
| M_p [%] | 12,57 | 12,57 | 0 |
| δ | 0,55 | 0,55 | 0 |
| ω_o [Hz] | 5,37 | 4,43 | -21,22 |
| ω_a [Hz] | 4,49 | 3,70 | -21,35 |

Na situação de paragem como é possível observar na Tabela 4.10, constata-se que tal como no ensaio de arranque e paragem e vazio, o número de amostras definidas para descrever o ensaio já são suficientes para que o tempo de pico da onda seja inferior ao tempo de pico obtido no ensaio ao MD. Neste caso, a limitação da velocidade de comunicação não é determinante para a validação dos resultados obtidos, na medida em que desta forma já é possível ao utilizador ajustar o número de amostras que descrevem a onda para que os tempos de pico e estabelecimento sejam similares aos do sistema físico do MD.

Para os ensaios de arranque e paragem em vazio e à plena carga realizados ao sistema de emulação, o número de pontos que descrevem as formas de onda de velocidade e que são enviados como referência de velocidade para os conversores de potência, são definidos para o conjunto das condições testadas em cada ensaio, isto é, não é feita uma diferenciação no número de pontos desejado para cada condição, facto que também justifica o erro relativo obtido. Esta medida caso tivesse sido implementada, era possível afinar nos casos em que a resposta do sistema de emulação é mais rápida que a do sistema do MD, o número de pontos que definem as

formas de onda para assim compensar os tempos de atraso, crescimento e sobrelevação do sistema de emulação em relação às respostas do sistema do MD.

4.5.2 – Ensaios de colocação e deslastre de cargas a velocidade constante

Os ensaios de colocação e deslastre de cargas, consistem tal como os que foram realizados ao MD, na emulação da resposta de velocidade do MD a situações de colocação e deslastre por parte do utilizador, de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5, do setor 3.3.2.

O procedimento para os ensaios de colocação e deslastre de cargas, consiste em arrancar com o motor assíncrono com o escalão mínimo de carga, regulando-o inicialmente para uma velocidade de funcionamento que se pretenda realizar o ensaio. As velocidades reguladas são de acordo com as utilizadas para os ensaios ao MD bem como os escalões de carga utilizados. Os escalões de carga aplicados pelo utilizador no sistema de emulação, são definidos em binário. Aplicando-se ou retirando-se escalões de carga, observa-se uma resposta dinâmica oscilatória, característica de um sistema de segunda ordem, tal como foi descrita a resposta de velocidade no sistema real do MD. Para cada escalão de carga, sendo este colocado ou deslastrado é então registado o regime oscilatório da máquina, que apenas após atingir o regime permanente é aplicada outra perturbação ao sistema.

Ensaios de Colocação dos Escalões de Carga Intermédio e Máximo:

Para o ensaio de colocação de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5 do setor 3.3.2, registou-se o comportamento do sistema de emulação, apresentado na Figura 4.17.

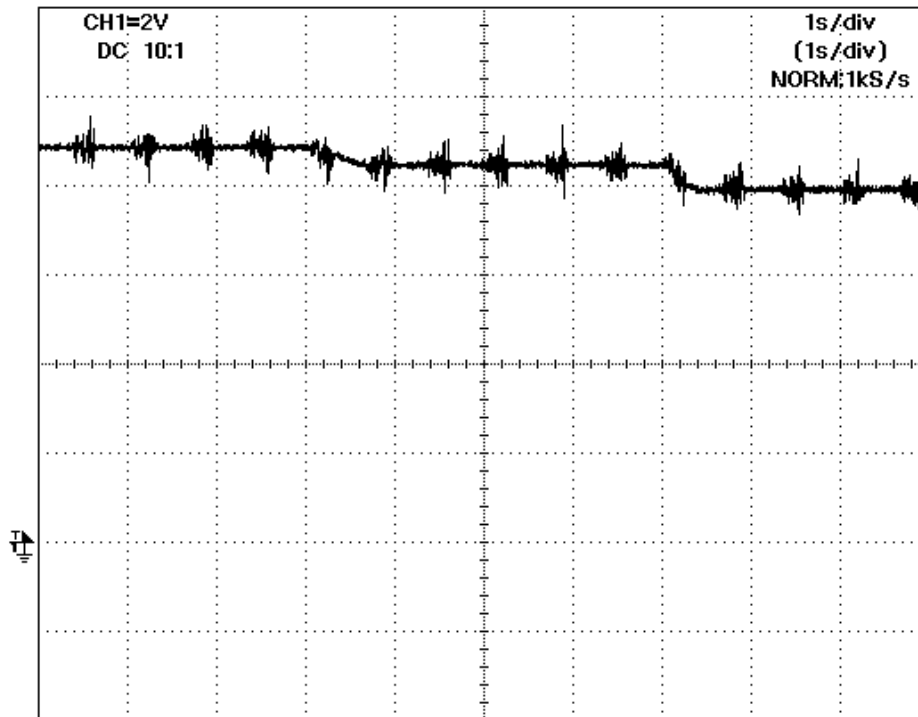


Figura 4.17 – Resposta de velocidade do sistema de emulação a ensaio de colocação de escalões de carga a 1770rpm

Relativamente ao ensaio de colocação de cargas de acordo com a Tabela 3.5 com a velocidade regulada a 1770rpm, obtiveram-se os seguintes parâmetros, apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Parâmetros obtidos do ensaio de colocação de escalões de carga a 1770rpm

| Parâmetros | Ensaio ao sistema de Emulação | | Ensaio ao sistema real do MD | | Erro relativo [%] | |
|-------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Mínimo → Intermédio | Intermédio → Máximo | Mínimo → Intermédio | Intermédio → Máximo | Mínimo → Intermédio | Intermédio → Máximo |
| t_r [s] | 0,45 | 0,20 | 0,25 | 0,13 | -80 | -53,85 |
| t_p [s] | 0,65 | 0,40 | 0,45 | 0,23 | -44,44 | -73,91 |
| t_d [s] | 0,35 | 0,15 | 0,15 | 0,10 | -133,33 | -50 |
| $y(t_p)$ [rpm] | 1650 | 1540 | 1650 | 1540 | 0 | 0 |
| $y(\infty)$ [rpm] | 1680 | 1570 | 1680 | 1570 | 0 | 0 |
| M_p [%] | 1,69 | 1,79 | 1,69 | 1,79 | 0 | 0 |
| δ | 0,81 | 0,79 | 0,81 | 0,79 | 0 | 0 |
| ω_o [Hz] | 8,24 | 12,81 | 11,90 | 22,77 | 30,76 | 43,74 |
| ω_a [Hz] | 4,83 | 7,85 | 6,68 | 13,93 | 27,69 | 43,65 |

Com os resultados obtidos para o ensaio de colocação de escalões de carga, verifica-se que a caracterização das respostas do MD para um sistema de segunda ordem é concordante com os resultados obtidos no sistema de emulação, no que se refere às velocidades de pico, em regime permanente, à sobrelevação relativa e consequentemente às constantes de amortecimento. Apenas no que se refere aos tempos de crescimento, de atraso e de pico, os valores diferem. Os resultados conseguidos representam o limite no que se refere ao número de pontos em que é descrita a forma de onda para ser perceptível e possuir os mesmos valores de velocidade, sobrelevação e constante de amortecimento que a resposta do MD. Por esta razão que aliada ao ruído da forma de onda obtida, apresenta um erro relativo elevado.

O ensaio de deslastre de escalões de carga não é aqui apresentado, dado que os parâmetros que descrevem a resposta são idênticos aos obtidos para o ensaio de colocação de cargas. Isto verifica-se porque tal como foi analisado na resposta do MD, as formas de onda bem como os

parâmetros que descrevem a sua resposta são idênticos aos observados aquando da colocação de cargas. O sistema apresenta assim a mesma resposta dinâmica quando sujeito à perturbação do mesmo escalão de carga, seja quando este for aplicado ou então retirado.

Ensaio de Colocação e Deslastre do Escalão Máximo de Carga:

O ensaio de colocação e deslastre do escalão máximo de carga, consiste em arrancar o sistema de emulação em vazio e regular a velocidade para a pretendida, colocando de seguida o escalão máximo de carga e por fim deslastrar o mesmo quando a resposta de velocidade atinge o regime permanente.

Para o ensaio de colocação do escalão máximo de carga e de seguida o seu deslastre após o sistema entrar em regime permanente, registou-se o comportamento do sistema de emulação, apresentado na Figura 4.18.

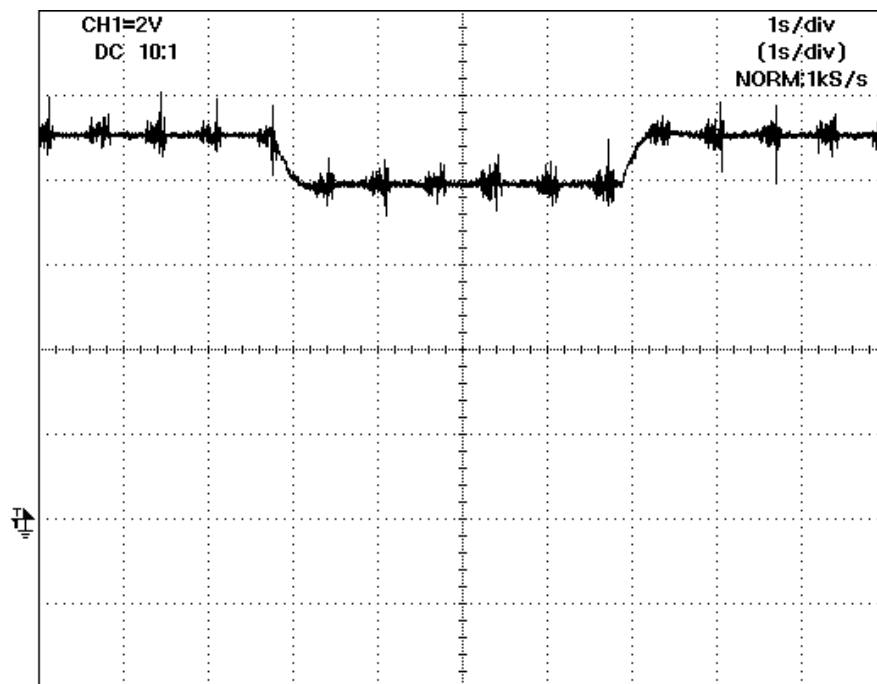


Figura 4.18 – Resposta de velocidade do sistema de emulação a ensaio de colocação e deslastre de escalão máximo de carga a 1800rpm e com escalão mínimo de carga

Para o ensaio patente na Figura 4.18, obtiveram-se os seguintes parâmetros para a situação de colocação de carga, apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Parâmetros obtidos do ensaio de colocação do escalão máximo de carga a 1800rpm

| Parâmetros | Ensaio ao sistema de Emulação | Ensaio ao sistema real do MD | Erro relativo [%] |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|
| t_r [s] | 0,25 | 0,10 | -150 |
| t_p [s] | 0,45 | 0,25 | -80 |
| t_d [s] | 0,20 | 0,05 | -300 |
| $y(t_p)$ [rpm] | 1858 | 1858 | 0 |
| $y(\infty)$ [rpm] | 1800 | 1800 | 0 |
| M_p [%] | 3,22 | 3,22 | 0 |
| δ | 0,71 | 0,71 | 0 |
| ω_o [Hz] | 9,91 | 17,84 | 44,45 |
| ω_a [Hz] | 6,98 | 12,57 | 44,47 |

Apenas são apresentados os resultados referentes à situação de colocação do escalão de carga, devido ao facto de a resposta do sistema ser igual na sua dinâmica para a situação de deslastre do mesmo escalão de carga.

Os resultados obtidos, conforme apresentado na Tabela 4.12, possuem as mesmas características que as restantes respostas já analisadas excetuando nas situações de paragem do sistema, na medida em que apresentam valores de velocidade de pico e em regime permanente, bem como de sobrelevação relativa e de constante de amortecimento idênticos às obtidas com a análise às respostas do sistema do MD. No que se refere aos parâmetros dos tempos de crescimento, pico e atraso e consequentes frequências o sistema apresenta valores divergentes. Tal deve-se à parametrização dos pontos que descrevem a forma de onda, que foram admitidos em função da sua perceção e caracterização, dada a limitação da velocidade de comunicação. Isto em conjunto com o ruído constituinte da forma de onda, resultam num erro relativo elevado.

4.6 – Conclusões

A proposta de utilização de dois motores assíncronos como apresentado neste capítulo, mostrou-se comprometida pela limitação ao nível do tipo de comunicação utilizada. O problema não recaiu no tipo de protocolo utilizado mas sim com os meios físicos existentes, nomeadamente a comunicação série entre os conversores de potência e o computador. O objetivo da emulação não fica no entanto em risco com a resposta obtida, apenas com a utilização de um motor assíncrono controlado em velocidade, pois caso a emulação da carga fosse concretizada com sucesso a resposta seria a mesma.

Os ensaios realizados ao sistema de emulação, permitem afirmar que as respostas de velocidade obtidas são semelhantes às respostas obtidas pelo MD presente no GGD, tido como base para este trabalho. Esta semelhança é mensurável no que toca aos parâmetros utilizados para a caracterização da resposta do MD, dado que como referido no setor 3.3.2 é realizada uma aproximação das respostas do sistema a um sistema de segunda ordem. Este método assenta por si só numa aproximação, em que para efeitos de facilidade de caracterização é optada esta via, contudo apresenta diferenças tal como é descrito no setor 4.5. Outro ponto fulcral para uma boa caracterização de resultados é a qualidade dos dados obtidos, o que não se verificou visto que de ambos os sistemas foram adquiridos os resultados com elevado ruído nas formas de onda, o que numa análise à mesma incrementa erro de difícil mensurabilidade na caracterização das respostas. Desta forma, como a emulação foi construída sob a caracterização das respostas de velocidade do MD obtidas com elevado ruído e sendo posteriormente as respostas de velocidade do sistema de emulação analisadas igualmente com elevado ruído, resulta numa comparação com erro acumulado. No entanto com todas as imprecisões encontradas, os resultados obtidos pelo sistema de emulação são semelhantes e com diferenças justificáveis, tal como encontrado no setor 4.5.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Resumo

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, descrevendo-se os objetivos conseguidos, impedimentos no decorrer do trabalho, bem como as perspetivas de desenvolvimento de trabalho futuro com a base criada por este.

5 – CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

5.1 – Conclusões

Para este trabalho propôs-se como objectivo base e como problema fundamental, a emulação de um MD como parte integrante de um GGD. Com base nesta premissa estudou-se o estado da arte relativo aos elementos que compõem um GGD, bem como dos pressupostos necessários para a realização de um estudo aos mesmos. Apresentou-se também um comparativo de métodos e processos de forma a atingir e contextualizar a emulação criada.

Com base nos diversos métodos e processos apresentados e com os elementos de laboratório disponíveis, elaborou-se uma proposta de solução do problema. Esta passou através da modelação matemática do sistema como um sistema de caixa preta, bem como o uso de conversores electrónicos de potência com a técnica de controlo directo de binário e o uso de motores assíncronos trifásicos.

Data a componente prática indispensável à concretização do objectivo base, procedeu-se então à variação de velocidade do GGD, com a posterior realização de ensaios a fim de se determinar as características eléctricas do gerador síncrono e as características mecânicas do MD.

Através dos ensaios obtidos e da análise dos seus resultados, realizou-se a caracterização e modelação matemática do GGD no que respeita a perdas eléctricas, bem como ao nível mecânico com a construção de um mapa de eficiência do MD e das respostas de velocidade em regime dinâmico e permanente.

Posto isto, realizou-se um programa de simulação numérica a fim de implementar o modelo matemático criado com base nas respostas de velocidade do MD, onde foi feita a implementação do protocolo de comunicação utilizado como base para o envio e receção de informação entre computador e conversores de potência. O programa desenvolvido possui a virtude de ter uma interface que permitir ao utilizador emular de forma interativa o MD perante as diferentes condições de funcionamento.

Construiu-se uma bancada de ensaios, com o sistema de emulação do MD controlado pelo utilizador, que permitiu a validação experimental do modelo matemático das respostas de velocidade do MD ao nível dinâmico e contínuo, para diferentes regimes de carga. A concretização deste marco permite concretizar um dos objectivos principais que é possibilidade

da realização de diferentes ensaios ao sistema emulado e prescindir da utilização do sistema físico do GGD.

Verificou-se o cumprimento na sua generalidade dos pressupostos inicialmente estabelecidos neste trabalho. Os objetivos foram na globalidade igualmente atingidos com sucesso e as ferramentas de suporte validadas.

Por fim, são apresentadas também algumas perspetivas de desenvolvimento futuro na área da emulação de sistemas mecânicos nomeadamente de um MD. O programa desenvolvido bem como a bancada de ensaios permite uma utilização futura no que diz respeito ao estudo e desenvolvimento de grupos geradores, deixando também uma porta aberta a outros tipos de abordagens para uma emulação de outro qualquer sistema físico.

5.2 – Perspetivas de desenvolvimento futuro

Perspetiva-se como desenvolvimento futuro deste trabalho a implementação no sistema de emulação, os dados do mapa de eficiência construído para a caracterização dos consumos específicos em função do binário e velocidade do MD. Tal aplicação torna-se valorizável na medida em que é a conjugação dos dois pontos principais deste trabalho, que permitem por sua vez a emulação do sistema, com os dados em tempo real dos consumos específicos em função das condições de funcionamento. Cria também a oportunidade de um estudo mais completo dos pontos de funcionamento ótimo num sistema real.

Dadas as limitações deste trabalho se prenderem fundamentalmente com os meios físicos que comportam a comunicação entre o utilizador e computador, é expectável que se possa realizar este processo de emulação sob diferentes meios. Meios estes que dizem respeito a uma substituição do módulo NMBA-01 da ABB®, responsável pela limitação física da comunicação série e que faz a conversão entre porta série RS-485 e fibra-ótica, que limita a velocidade de comunicação entre computador e conversores de potência a 19200bit/s.

Perante a substituição do módulo de comunicação ou a colocação no sistema de emulação de outro sistema físico de comunicação, perspetiva-se a colocação em funcionamento do motor assíncrono controlado em binário de forma a que se obtenha a emulação da carga no veio do MD. Com estas modificações físicas e com a colocação em serviço da máquina controlada em binário poderá também permitir a optimização de todo o conjunto, nomeadamente, como por

exemplo, a optimização do numero de amostras da forma de onda construída, o que influencia por sua vez a regulação dos t_r , t_p , t_d e restantes características da resposta de velocidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rajput R. K., *Internal Combustion Engines*.: Laxmi Publications, 2005.
- [2] Petchers N., *Combined Heating, Cooling, and Power Handbook*.: The Fairmont Press, Inc., 2003.
- [3] Kolton, E. P., "Motores de Combustão Interna," FIB, Salvador, 2004.
- [4] Demirbas, A., *Biohydrogen: For Future Engine Fuel Demands*.: Springer, 2009.
- [5] Seale, J. N., Jardim, C. E. L., and Fontes, M., *Motores Diesel*. Lisboa: Presença, imp., 1978.
- [6] Heywood, J. B. and Anne Duffy, J. M. M., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, Ed., 1988.
- [7] Mollenhauer, K. and Tschoeke, H., *Handbook of Diesel Engines*.: Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010.
- [8] Challen, B. and Baranescu, R., *Diesel Engine Reference Book*, 2nd ed.: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [9] Bell, J. A., *Modern Diesel Technology: Electricity and Electronics*, 1st ed.: Cengage Learning, 2007.
- [10] Alves, M.F., *ABC das Máquinas Eléctricas*. Porto, Portugal: ISEP, 2003.
- [11] Guru, B. S. and H. R. Hiziroglu, *Electric Machinery and Transformers*, 3rd ed. USA: Oxford University Press, 2000.
- [12] Tcheslavski, G.V., *Fundamentals of Power Engineering*, 2008.
- [13] Bakshi, U. A. and Bakshi, M. V., *D.C. Machines and Synchronous Machines*, 1st ed.: Technical Publications Pune, 2007.
- [14] Lakshminarayanan, P.A. and Aghav, Y. V., *Modelling Diesel Combustion*, 1st ed., Shi, Y., Ed.: Springer, 2010.
- [15] Stamford Power Generation, SX460 Automatic Voltage Regulator (AVR) - manual, 2003.
- [16] Stamford Power Generation, AC Generators from Newage International - manual, 2001.
- [17] Islam Sirajul. Electrical Engineering blog. [Online]. <http://eblogbd.com/>
- [18] H. Shayeghi and J. Dadashpour, "Anarchic Society Optimization Based PID Control of an Automatic Voltage Regulator (AVR) System," Technical Engineering Department, Ardabil, Irão, 2012.
- [19] R. Sushant, S.A. Kulkarni, and N.B. Dhande, "Design and Development of Microcontroller Based Electronic Speed Governor for Genset/Automotive Engine," Sinhgad College of Engineering, Pune, India, 2012.
- [20] Mohammad Abdulqader, *Diesel Generator Auxiliary Systems and Instruments*, 2nd ed. Amman, Jordan: Najah Engineering Consultants LCC, 2006.
- [21] Chow, A. and Wyszynski, M., "Thermodynamic modelling of complete engine system - a review," 2008.
- [22] Rakopoulos, C. D. and Giakoumis E., "Review of Thermodynamic Diesel Engine Simulations under Transient Operating Conditions," 2006.
- [23] Charlton, S. J., "SPICE - Simulation Program for Internal Combustion Engine - User Manual," 1992.
- [24] Morel, T. and Keribar R. B. P. N., "A new approach to integrating engine performance and component design analysis through simulation," 1998.

- [25] B. Sendyka and M. Cygnar, "Stratified Charge Combustion in a Spark-Ignition Engine With Direct Injection System," Cracow University of Technology, Cracow, 2013.
- [26] Reitz, R. D. R. C. and Rutland, C. J., "Development and testing of diesel engine CFD models," University of Wisconsin Madison, WI, 1995.
- [27] Jasak, H., Luo, J., Kaluderčić, B., and Gosman, A., "Rapid CFD Simulation of Internal Combustion Engines, SAE Technical Paper," University of Stuttgart, 1999.
- [28] Du, W., Bao, X., Xu, J., and Wei, W., "Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations," China University of Petroleum, Beijing, 2005.
- [29] Sazhina, E. M., Heikal, M. R., and Babushok, V. I., *A detailed modelling of the spray ignition process in diesel engines*. Brighton: Gordon and Breach Science Publishers imprint, 2000.
- [30] Ashhab, M. S. S., Stefanopoulou, A. G., Cook, J. A., and Levin, M. B., "Control-Oriented Camless Intake Process (Part I)," University of California, Santa Barbara, 2010.
- [31] Jelfrey, A., Cook, and Powel, B. K., "Modelling of an Internal Combustion Engine for Control Analysis," Ford Motor Co, Dearborn, 1988.
- [32] Guzzella, L. and Onder, C. H., *Introduction to Modelling and Control of Internal Combustion Engine Systems - Second Edition*. Zurich, Switzerland: Springer, 2010.
- [33] Hiroyasu, H., "Diesel Engine Combustion and Its Modelling," University of Hiroshima, 1985.
- [34] Primus, R. J. and Wong V.W., *Performance and Combustion Modeling of Heterogeneous Charge Engines*.: Society of Automotive Engineers, 1985.
- [35] Tao, F., Golovitchev, V., and Chomiak, J., "A phenomenological model for the prediction of soot formation in diesel spray combustion," Chalmers University of Technology, Göteborg, 2002.
- [36] Liu, Y., Yang, J., Sun, J., Zhu, A., and Zhou, Q., "A Phenomenological Model for Prediction Auto-Ignition and Soot Formation of Turbulent Diffusion Combustion in a High Pressure Common Rail Diesel Engine," School of Mechanical and Electronic and Automobile Engineering, Beijing, China, 2011.
- [37] Cipromec, *Sebenta de Complementos de Máquinas Eléctricas*, ISEL, Ed.: Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação.
- [38] Stone, R., *Introduction to Internal Combustion Engines*, 3rd ed.: Society of Automotive Engineers Inc., 1999.
- [39] Cooper, A. R., Morrow, D. J., and McGowan, D. J., "Recreating the Mechanical Response of a Diesel Generator Set using a Variable Speed DC Drive," 2006.
- [40] Sehab, R. and Feld, G., "Vehicle Drivetrain: Emulation and Simulation Using," Laboratoire de Mécatronique, ESTACA Campus Ouest Rue Georges Charpak, Laval Cedex, France, 2011.
- [41] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines," Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2009.
- [42] Leroy Somer, "R220 A.V.R - Instalação e Manutenção," 2013.
- [43] Rakopoulos C. D. and Giakoumis E. G., *Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis*, 1st ed.: Springer, 2009.
- [44] Soares, J. V. S., "Sebenta de Controlo de Sistemas I," ISEL, 2005.
- [45] Rodeia, N., "Desenvolvimento do sistema de tracção de um veículo eléctrico ecológico com

- travagem regenerativa," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [46] Barata, F., Luís, R., and Pereira, R., "Plataforma Electromecânica de Emulação de um Sistema de Voo, Projecto Final de Curso," ISEL, Lisboa, 2002.
 - [47] Aaltonen, M., Tiitinen, P., Lalu, J., and Heikkilä. (1995, Mar) Regulación directa del par de accionamientos trifásicos.
 - [48] Vas, P., *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. New York, USA: Oxford Science Publications, 1998.
 - [49] Quadrado, J.C., "Accionamientos Electromecánicos Inteligentes – Metodologia de Controlo para Posicionadores Angulares, Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores," IST, Lisboa, 2000.
 - [50] ABB. (1998, October) Motion Control Application Program 1.1 for ACS 600 Frequency Converters. Manual.
 - [51] Fernandes, M., "Modelação e Controlo de um Motor Brushless," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.
 - [52] Ribeiro, H. C., "Controlo de Velocidade de um Motor de Indução Trifásico suportados em Microcontrolador," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.
 - [53] Palma, J., *Accionamientos Electromecánicos de Velocidade Variável*, Fundação Calouste Gulbenkian, Ed., 1999.

ANEXO I

ELEMENTOS COMPLEMENTARES À REALIZAÇÃO DO TRABALHO

Resumo

Neste anexo encontram-se os elementos que servem de suporte à realização do trabalho, nomeadamente resultados de ensaios, parametrizações diversas e programa de emulação.

ANEXO I – ELEMENTOS COMPLEMENTARES À REALIZAÇÃO DO TRABALHO

I.1 – Código do programa em Matlab para obtenção dos gráficos do mapa de eficiência do MD

```
clc; clear;

Potencias=[1300 2500 5500 8000 10800 12500 14400 16500 17500 19600 20500
21500 22700 23300];

valores=xlsread('30.xls');
Pmax(1,1)=max(valores(:,1));
ginterp30=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('35.xls');
Pmax(1,2)=max(valores(:,1));
ginterp35=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('40.xls');
Pmax(1,3)=max(valores(:,1));
ginterp40=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('45.xls');
Pmax(1,4)=max(valores(:,1));
ginterp45=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('50.xls');
Pmax(1,5)=max(valores(:,1));
ginterp50=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('55.xls');
Pmax(1,6)=max(valores(:,1));
ginterp55=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('60.xls');
Pmax(1,7)=max(valores(:,1));
ginterp60=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('65.xls');
Pmax(1,8)=max(valores(:,1));
ginterp65=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('70.xls');
Pmax(1,9)=max(valores(:,1));
ginterp70=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('75.xls');
Pmax(1,10)=max(valores(:,1));
ginterp75=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);
```

```

valores=xlsread('80.xls');
Pmax(1,11)=max(valores(:,1));
ginterp80=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

valores=xlsread('85.xls');
Pmax(1,12)=max(valores(:,1));
ginterp85=interp1(valores(:,1)', valores(:,2)', Potencias, 'spline', NaN);

%Matriz de ensaio
fuelmap=[ginterp30; ginterp35; ginterp40; ginterp45; ginterp50; ginterp55;
ginterp60; ginterp65; ginterp70; ginterp75; ginterp80; ginterp85];

%matriz velocidade vs. Potencia
Vel=900:150:2550;
Pot=Potencias/1000;

[Pot1,Vel1]=meshgrid(Pot, Vel); %matriz velocidade vs. Potencia

torque=Pot1*1000./(2*pi*Vel1/60);

%REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS

%Gráfico dos dados
figure(1)
surf(Vel1,Pot1,fuelmap)
%adição de títulos, eixos:
title('Superfície de consumo')
axis([900 2600 0 25 0 2500])
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Potência (kW)')
zlabel('Consumo específico (g/kWh)')
view(-135,30)

figure(2)
surf(Vel1, torque, fuelmap)
%adição de títulos, eixos:
title('Superfície de consumo')
axis([900 2600 0 140 0 2500])
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Binário (Nm)')
zlabel('Consumo específico (g/kWh)')
view(-135,30)

%Gráfico dos dados (superfícies suavizadas)
figure(3)
[rpm,kW]=meshgrid(900:25:2550, 0:0.5:25);
Z10=griddata(Vel1, Pot1,fuelmap,rpm,kW,'cubic');
surf(rpm,kW,Z10,'EdgeColor','none','FaceColor','interp','FaceLighting','phong')
title('Mapa de Eficiência - Superfície de Consumo')
axis([900 2600 0 25 0 2500])
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Potência (kW)')
zlabel('Consumo específico (g/kWh)')
view(-135,30)

figure(4)
[rpm,Nm]=meshgrid(900:25:2550, 0:5:180);
Z11=griddata(Vel1, torque,fuelmap,rpm,Nm,'cubic');

```

```
surf(rpm,Nm,Z11,'EdgeColor','none','FaceColor','interp','FaceLighting','phong')
title('Mapa de Eficiência - Superfície de Consumo')
axis([900 2600 0 140 0 2500])
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Binário (Nm)')
zlabel('Consumo específico (g/kWh)')
view(-135,30)

%Escolha das curvas de nível (superfícies suavizadas)

figure(5)
[rpm,kW]=meshgrid(900:25:2550, 0:0.5:25);
Z10=griddata(Vel1, Pot1,fuelmap,rpm,kW,'cubic');
surf(rpm,kW,Z10,'EdgeColor','none','FaceColor','interp','FaceLighting','phong')
hold on
ncont=[270, 275, 280, 285, 290, 300, 305, 310, 315, 320, 330, 340, 360, 380,
400, 500, 600, 800, 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, 2000];
%ncont=[270,272, 275,277, 280,281,282,283,284,285,286,287,288,289
290,291,292,293,294 295,296,297,298,299, 300,302, 305, 310, 315, 320,325,
330, 335, 340, 350, 360, 380, 400, 500, 600, 800, 1000];
contour3(rpm,kW,Z10,ncont,'k')
title('Mapa de Eficiência - Superfície de Consumo')
axis([900 2600 0 25 0 2500])
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Potência (kW)')
zlabel('Consumo específico (g/kWh)')
view(-135,30)
colorbar

figure(6)
[rpm,Nm]=meshgrid(900:25:2550, 0:5:180);
Z11=griddata(Vel1, torque,fuelmap,rpm,Nm,'cubic');
surf(rpm,Nm,Z11,'EdgeColor','none','FaceColor','interp','FaceLighting','phong')
hold on
contour3(rpm,Nm,Z11,ncont,'k')
title('Mapa de Eficiência - Superfície de Consumo')
axis([900 2600 0 140 0 2500])
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Binário (Nm)')
zlabel('Consumo específico (g/kWh)')
view(-135,30)
colorbar

%mapa de eficiência vs. (vel vs. pot.)
figure(7)
[rpm,kW]=meshgrid(900:25:2550, 0:0.5:25);
Z10=griddata(Vel1, Pot1,fuelmap,rpm,kW,'cubic');
[C10,h10]=contour(rpm,kW,Z10,ncont);
%ncont1=200:5:3000;
%[C10,h10]=contour(rpm,kW,Z10,ncont1)
hold on
clabel(C10,h10)
hold on
colormap(hsv(10))
hold on
plot(Vel,Pmax/1000,'LineWidth',3)
title('Mapa de Eficiência - Velocidade vs. Potência')
```

```

xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Potência (kW)')

%mapa de eficiência vs. (vel vs. pot.); trajetória ótima
figure (8)
[rpm,kW]=meshgrid(900:10:2550, 0:0.25:25);
Z10=griddata(Vel1, Pot1,fuelmap,rpm,kW,'cubic');
[C10,h10]=contour(rpm,kW,Z10,ncont);
hold on
clabel(C10,h10)
hold on
colormap(hsv(10))
hold on
plot(Vel,Pmax/1000,'LineWidth',3)
hold on
[minimum, inform]=min(Z10);
plot(rpm(1,:),kW(inform(1,:)),,'LineWidth',2)
title('Mapa de Eficiência - Velocidade vs. Potência - Trajetória Ótima')
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Potência (kW)')

%mapa de eficiência vs. (vel vs. bin.)
figure (9)
[rpm,Nm]=meshgrid(900:25:2550, 0:5:150);
Z11=griddata(Vel1, torque,fuelmap,rpm,Nm,'cubic');
[C11,h11]=contour(rpm,Nm,Z11,ncont);
hold on
clabel(C11,h11)
hold on
colormap(hsv(10))
hold on
Tmax=Pmax./(2*pi*Vel/60); %ERRADO: perdas do gerador!!
plot(Vel,Tmax,'LineWidth',3)
title('Mapa de Eficiência do GGD - Velocidade vs. Binário')
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Binário (Nm)')

%mapa de eficiência vs. (vel vs. bin.); trajetória ótima
figure (10)
[rpm,Nm]=meshgrid(900:10:2550, 0:1:150);
Z11=griddata(Vel1, torque,fuelmap,rpm,Nm,'cubic');
[C11,h11]=contour(rpm,Nm,Z11,ncont);
hold on
clabel(C11,h11)
hold on
colormap(hsv(10))
hold on
plot(Vel,Tmax,'LineWidth',3)
hold on
[minimum, inform]=min(Z11);
plot(rpm(1,:),Nm(inform(1,:)),,'LineWidth',2)
hold on
ncont2=[2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5];
ncont2=[2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24];
[C2,h2]=contour(Vel1,torque,Pot1,ncont2,'k');
clabel(C2,h2, 'EdgeColor','red')
title('Mapa de Eficiência do GGD - Velocidade vs. Binário - Trajetória Ótima')
xlabel('Velocidade (rpm)')
ylabel('Binário (Nm)')

```

I.2 – Resultados dos ensaios ao grupo gerador Diesel em regime permanente

Apresenta-se na Tabela I.1, os dados de consumo de combustível, de corrente medida aos terminais do gerador síncrono do GGD, a potência activa calculada, a potência activa produzida pelo MD depzadas as perdas mecânicas, o consumo específico e o consumo de combustível em l/h, obtidos a partir dos ensaios realizados ao GGD em regime permanente, para posterior obtenção do mapa de eficiência do MD.

Tabela I.1 – Dados obtidos a partir dos ensaios ao GGD em regime permanente

| Velocidade (rpm) | Consumo (g) | I1 (A) | I2 (A) | I3 (A) | Potência calculada (kW) | Potência Produzida por MD (kW) | Consumo Específico (g/kWh) | Consumo (l/h) |
|------------------|-------------|--------|--------|--------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| 900 | 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,93 |
| | 43 | 1,3 | 1,26 | 1,3 | 555,84 | 557,82 | 1541,71 | 1,05 |
| | 46 | 2,41 | 2,41 | 2,37 | 1028,17 | 1035,02 | 888,86 | 1,12 |
| | 57 | 5,19 | 5,32 | 5,21 | 2279,40 | 2312,00 | 493,07 | 1,39 |
| | 69 | 7,58 | 7,56 | 7,39 | 3176,73 | 3243,47 | 425,47 | 1,68 |
| | 78 | 10,3 | 10,5 | 10,31 | 4417,62 | 4544,55 | 343,26 | 1,90 |
| | 90 | 12,44 | 12,62 | 12,45 | 5288,91 | 5473,19 | 328,87 | 2,19 |
| | 88 | 13,66 | 13,82 | 13,56 | 5827,68 | 6048,18 | 290,99 | 2,15 |
| | 108 | 16,3 | 16,53 | 16,3 | 6927,33 | 7243,10 | 298,21 | 2,63 |
| | 123 | 18,55 | 18,92 | 18,5 | 7947,74 | 8357,47 | 294,34 | 3,00 |
| | 132 | 21,3 | 21,5 | 21,12 | 8884,88 | 9419,31 | 280,27 | 3,22 |
| | 145 | 23,58 | 24 | 23,5 | 10022,28 | 10683,30 | 271,45 | 3,54 |
| | 163 | 25,8 | 26,2 | 25,7 | 10878 | 11668,21 | 279,31 | 3,98 |

| Velocidade (rpm) | Consumo (g) | I1 (A) | I2 (A) | I3 (A) | Potência calculada (kW) | Potência Produzida por MD (kW) | Consumo Específico (g/kWh) | Consumo (l/h) |
|------------------|-------------|--------|--------|--------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| 1050 | 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,10 |
| | 46 | 1,5 | 1,48 | 1,52 | 751,5 | 754,18 | 1219,85 | 1,12 |
| | 57 | 2,77 | 2,8 | 2,76 | 1382,78 | 1391,96 | 818,98 | 1,39 |
| | 71 | 5,89 | 6,08 | 6,04 | 2989,66 | 3032,31 | 468,28 | 1,73 |
| | 81 | 8,77 | 8,83 | 8,74 | 4372,44 | 4463,31 | 362,95 | 1,98 |
| | 94 | 11,79 | 12,04 | 11,96 | 5905,35 | 6072,67 | 309,58 | 2,29 |
| | 111 | 14,48 | 14,72 | 14,61 | 7272,46 | 7522,86 | 295,1 | 2,71 |
| | 117 | 15,66 | 16,07 | 15,9 | 7858,95 | 8154,81 | 286,94 | 2,85 |
| | 129 | 18,41 | 18,85 | 18,56 | 9266,12 | 9672,34 | 266,73 | 3,15 |
| | 150 | 21,31 | 21,87 | 21,7 | 10640,32 | 11189,17 | 268,11 | 3,66 |
| | 175 | 24,45 | 25 | 24,86 | 12112,53 | 12832,91 | 272,73 | 4,27 |
| | 200 | 26,89 | 27,6 | 27,27 | 13326,88 | 14199,48 | 281,7 | 4,89 |
| | 231 | 29,3 | 30 | 29,89 | 14448,78 | 15488,02 | 298,29 | 5,63 |
| | 305 | 29,96 | 30,99 | 30,22 | 14496,03 | 15582,37 | 391,46 | 7,44 |
| 1200,00 | 50,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,22 |
| | 59,00 | 1,74 | 1,71 | 1,75 | 993,20 | 996,79 | 1183,80 | 1,44 |
| | 65,00 | 3,20 | 3,25 | 3,17 | 1837,42 | 1849,65 | 702,84 | 1,59 |
| | 87,00 | 6,76 | 7,10 | 7,00 | 4025,98 | 4083,00 | 426,16 | 2,12 |
| | 98,00 | 10,06 | 10,24 | 10,10 | 5836,80 | 5957,37 | 329,00 | 2,39 |
| | 123,00 | 13,68 | 13,98 | 13,77 | 7954,56 | 8177,88 | 300,81 | 3,00 |
| | 145,00 | 16,58 | 13,98 | 13,77 | 8422,70 | 8678,26 | 334,17 | 3,54 |
| | 152,00 | 18,13 | 18,57 | 18,30 | 10505,00 | 10898,10 | 278,95 | 3,71 |
| | 181,00 | 21,84 | 22,25 | 22,02 | 12560,90 | 13128,94 | 275,73 | 4,41 |
| | 206,00 | 24,74 | 25,17 | 24,89 | 14212,00 | 14939,59 | 275,78 | 5,02 |
| | 235,00 | 28,10 | 28,77 | 28,40 | 16030,76 | 16977,36 | 276,84 | 5,73 |
| | 258,00 | 29,52 | 30,14 | 30,00 | 16856,08 | 17903,21 | 288,22 | 6,29 |
| | 283,00 | 30,90 | 31,60 | 31,34 | 17454,24 | 18602,05 | 304,27 | 6,90 |
| 1350,00 | 64,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,56 |
| | 69,00 | 1,70 | 1,68 | 1,78 | 1109,40 | 1112,93 | 1239,97 | 1,68 |
| | 77,00 | 3,34 | 3,49 | 3,52 | 2225,25 | 2239,37 | 687,69 | 1,88 |
| | 103,00 | 7,55 | 7,74 | 7,63 | 4927,80 | 4996,39 | 412,30 | 2,51 |
| | 125,00 | 11,11 | 11,16 | 11,24 | 7137,63 | 7283,54 | 343,24 | 3,05 |
| | 158,00 | 15,18 | 15,30 | 15,07 | 9702,15 | 9971,06 | 316,92 | 3,85 |
| | 175,00 | 18,60 | 18,75 | 18,47 | 11889,66 | 12293,24 | 284,71 | 4,27 |
| | 183,00 | 20,21 | 20,34 | 19,98 | 12832,36 | 13306,93 | 275,04 | 4,46 |
| | 211,00 | 23,30 | 23,44 | 23,18 | 14753,12 | 15386,67 | 274,26 | 5,15 |
| | 250,00 | 27,26 | 27,58 | 26,97 | 17180,10 | 18048,55 | 277,03 | 6,10 |
| | 289,00 | 29,73 | 30,14 | 29,52 | 18771,90 | 19809,81 | 291,77 | 7,05 |
| | 391,00 | 31,25 | 31,73 | 31,08 | 19752,60 | 20902,60 | 374,12 | 9,54 |

| Velocidade (rpm) | Consumo (g) | I1 (A) | I2 (A) | I3 (A) | Potência calculada (kW) | Potência Produzida por MD (kW) | Consumo Específico (g/kWh) | Consumo (l/h) |
|------------------|-------------|--------|--------|--------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| 1500,00 | 67,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,63 |
| | 77,00 | 1,84 | 1,82 | 1,89 | 1282,05 | 1286,13 | 1197,39 | 1,88 |
| | 96,00 | 3,60 | 3,77 | 3,78 | 2575,65 | 2592,00 | 740,74 | 2,34 |
| | 117,00 | 8,10 | 8,25 | 8,18 | 5666,43 | 5744,69 | 407,33 | 2,85 |
| | 140,00 | 11,75 | 11,90 | 11,90 | 8212,05 | 8375,63 | 334,30 | 3,41 |
| | 171,00 | 16,24 | 16,36 | 16,10 | 11201,00 | 11507,26 | 297,20 | 4,17 |
| | 190,00 | 18,07 | 18,21 | 17,87 | 12454,50 | 12833,05 | 296,11 | 4,63 |
| | 222,00 | 22,47 | 22,72 | 22,37 | 15538,80 | 16128,37 | 275,29 | 5,41 |
| | 251,00 | 25,87 | 26,16 | 25,89 | 17843,68 | 18628,87 | 269,47 | 6,12 |
| | 311,00 | 30,18 | 30,61 | 29,97 | 20693,28 | 21760,82 | 285,83 | 7,59 |
| 1650,00 | 81,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,98 |
| | 96,00 | 1,86 | 1,82 | 1,83 | 1267,30 | 1271,31 | 1510,25 | 2,34 |
| | 117,00 | 6,10 | 6,27 | 6,24 | 4280,30 | 4325,36 | 541,00 | 2,85 |
| | 132,00 | 7,93 | 8,13 | 8,08 | 5552,20 | 5627,70 | 469,11 | 3,22 |
| | 145,00 | 12,23 | 12,52 | 12,49 | 8565,20 | 8743,89 | 331,66 | 3,54 |
| | 185,00 | 16,78 | 17,10 | 16,90 | 11628,62 | 11960,42 | 309,35 | 4,51 |
| | 203,00 | 19,24 | 19,86 | 19,49 | 13417,11 | 13858,99 | 292,95 | 4,95 |
| | 222,00 | 20,98 | 21,75 | 21,24 | 14649,13 | 15176,19 | 292,56 | 5,41 |
| | 227,00 | 22,70 | 23,51 | 23,01 | 15782,16 | 16399,78 | 276,83 | 5,54 |
| | 240,00 | 24,47 | 25,30 | 24,79 | 16999,68 | 17716,94 | 270,93 | 5,85 |
| | 262,00 | 26,23 | 27,11 | 26,57 | 18219,48 | 19044,26 | 275,15 | 6,39 |
| | 282,00 | 28,10 | 28,95 | 28,36 | 19473,48 | 20416,85 | 276,24 | 6,88 |
| | 303,00 | 29,60 | 30,82 | 30,12 | 20643,12 | 21704,50 | 279,20 | 7,39 |
| | 314,00 | 32,17 | 32,57 | 32,03 | 22063,56 | 23277,94 | 269,78 | 7,66 |
| | 348,00 | 33,94 | 34,30 | 33,70 | 23242,32 | 24591,75 | 283,02 | 8,49 |
| 1800,00 | 86,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,10 |
| | 96,00 | 1,85 | 1,82 | 1,91 | 1288,98 | 1293,09 | 1484,82 | 2,34 |
| | 97,00 | 3,70 | 3,69 | 3,82 | 2589,51 | 2605,94 | 744,45 | 2,37 |
| | 129,00 | 8,02 | 8,35 | 8,18 | 5671,05 | 5748,80 | 448,79 | 3,15 |
| | 156,00 | 12,57 | 12,90 | 12,63 | 8801,10 | 8987,39 | 347,15 | 3,80 |
| | 179,00 | 16,12 | 16,62 | 16,21 | 11307,45 | 11614,77 | 308,23 | 4,37 |
| | 215,00 | 20,21 | 21,06 | 20,67 | 14246,20 | 14739,02 | 291,74 | 5,24 |
| | 243,00 | 23,62 | 24,76 | 24,19 | 16691,10 | 17369,15 | 279,81 | 5,93 |
| | 280,00 | 27,70 | 29,07 | 28,51 | 19529,12 | 20468,85 | 273,59 | 6,83 |
| | 297,00 | 29,42 | 30,89 | 30,30 | 20749,69 | 21812,29 | 272,32 | 7,24 |
| | 264,00 | 31,10 | 32,55 | 31,95 | 21892,40 | 23077,16 | 228,80 | 6,44 |
| | 339,00 | 32,94 | 34,49 | 33,90 | 23204,57 | 24538,13 | 276,30 | 8,27 |

| Velocidade (rpm) | Consumo (g) | I1 (A) | I2 (A) | I3 (A) | Potência calculada (kW) | Potência Produzida por MD (kW) | Consumo Específico (g/kWh) | Consumo (l/h) |
|------------------|-------------|--------|--------|--------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| 1950,00 | 92,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,24 |
| | 101,00 | 1,89 | 1,92 | 1,87 | 1312,08 | 1316,33 | 1534,57 | 2,46 |
| | 110,00 | 3,70 | 3,91 | 3,74 | 2621,85 | 2638,64 | 833,76 | 2,68 |
| | 126,00 | 8,31 | 8,44 | 8,44 | 5818,89 | 5900,37 | 427,09 | 3,07 |
| | 157,00 | 12,09 | 12,09 | 12,11 | 8382,99 | 8551,42 | 367,19 | 3,83 |
| | 187,00 | 15,78 | 15,81 | 15,70 | 10923,99 | 11209,91 | 333,63 | 4,56 |
| | 218,00 | 20,32 | 20,35 | 19,85 | 13919,60 | 14388,97 | 303,01 | 5,32 |
| | 250,00 | 24,78 | 24,75 | 23,94 | 16898,10 | 17592,46 | 284,21 | 6,10 |
| | 289,00 | 29,22 | 29,13 | 28,07 | 19790,18 | 20755,49 | 278,48 | 7,05 |
| | 326,00 | 30,99 | 30,88 | 29,94 | 21024,49 | 22116,25 | 294,81 | 7,95 |
| | 323,00 | 32,66 | 32,51 | 31,56 | 22054,44 | 23268,95 | 277,62 | 7,88 |
| | 337,00 | 34,58 | 34,42 | 33,35 | 23335,80 | 24698,70 | 272,89 | 8,22 |
| 2100,00 | 108,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,63 |
| | 121,00 | 1,85 | 1,85 | 1,89 | 1291,29 | 1295,40 | 1868,15 | 2,95 |
| | 123,00 | 3,68 | 3,66 | 3,71 | 2552,55 | 2568,42 | 957,79 | 3,00 |
| | 145,00 | 8,13 | 8,25 | 8,05 | 5643,33 | 5719,69 | 507,02 | 3,54 |
| | 170,00 | 11,75 | 12,00 | 11,80 | 8212,05 | 8373,10 | 406,06 | 4,15 |
| | 201,00 | 16,23 | 16,54 | 16,33 | 11293,00 | 11600,46 | 346,54 | 4,90 |
| | 224,00 | 20,67 | 20,95 | 20,53 | 14294,50 | 14788,91 | 302,93 | 5,46 |
| | 264,00 | 24,12 | 24,54 | 24,10 | 16734,80 | 17415,18 | 303,18 | 6,44 |
| | 296,00 | 28,49 | 28,88 | 28,16 | 19586,37 | 20532,00 | 288,33 | 7,22 |
| | 305,00 | 30,28 | 30,66 | 29,88 | 20797,78 | 21866,67 | 278,96 | 7,44 |
| | 330,00 | 31,96 | 32,31 | 31,53 | 21842,40 | 23034,84 | 286,52 | 8,05 |
| | 335,00 | 33,08 | 34,21 | 33,33 | 22941,36 | 24259,96 | 276,18 | 8,17 |
| 2250,00 | 116,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,83 |
| | 123,00 | 1,86 | 1,85 | 1,90 | 1295,91 | 1300,04 | 1892,25 | 3,00 |
| | 128,00 | 3,73 | 3,70 | 3,75 | 2582,58 | 2598,77 | 985,08 | 3,12 |
| | 144,00 | 5,48 | 5,64 | 5,63 | 3869,25 | 3905,26 | 737,47 | 3,51 |
| | 162,00 | 10,00 | 10,10 | 9,92 | 6934,62 | 7049,16 | 459,63 | 3,95 |
| | 196,00 | 13,64 | 13,81 | 13,60 | 9482,55 | 9696,58 | 404,27 | 4,78 |
| | 229,00 | 18,11 | 18,24 | 17,86 | 12522,51 | 12896,99 | 355,12 | 5,59 |
| | 233,00 | 20,72 | 20,23 | 19,69 | 13947,20 | 14417,02 | 323,23 | 5,68 |
| | 258,00 | 21,89 | 22,20 | 21,64 | 15117,90 | 15671,15 | 329,27 | 6,29 |
| | 285,00 | 26,25 | 26,71 | 25,79 | 18112,50 | 18911,86 | 301,40 | 6,95 |
| | 320,00 | 30,61 | 31,17 | 30,26 | 21077,16 | 22177,39 | 288,58 | 7,80 |
| | 333,00 | 32,64 | 33,16 | 32,25 | 22355,40 | 23608,66 | 282,10 | 8,12 |
| | 352,00 | 34,27 | 34,78 | 33,98 | 23490,84 | 24878,70 | 282,97 | 8,59 |

| Velocidade (rpm) | Consumo (g) | I1 (A) | I2 (A) | I3 (A) | Potência calculada (kW) | Potência Produzida por MD (kW) | Consumo Específico (g/kWh) | Consumo (l/h) |
|------------------|-------------|--------|--------|--------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| 2400,00 | 124,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,02 |
| | 135,00 | 1,89 | 1,81 | 1,90 | 1293,60 | 1297,71 | 2080,59 | 3,29 |
| | 146,00 | 4,00 | 3,82 | 4,07 | 2746,59 | 2764,81 | 1056,13 | 3,56 |
| | 170,00 | 8,55 | 8,27 | 8,49 | 5846,61 | 5927,86 | 573,56 | 4,15 |
| | 193,00 | 12,20 | 11,94 | 12,26 | 8408,40 | 8576,09 | 450,09 | 4,71 |
| | 222,00 | 16,75 | 16,40 | 16,43 | 11452,98 | 11765,12 | 377,39 | 5,41 |
| | 234,00 | 18,50 | 18,08 | 18,15 | 12642,63 | 13023,82 | 359,34 | 5,71 |
| | 264,00 | 22,87 | 22,62 | 22,37 | 15607,80 | 16197,97 | 325,97 | 6,44 |
| | 292,00 | 26,30 | 26,22 | 25,82 | 17939,86 | 18731,59 | 311,77 | 7,12 |
| | 329,00 | 30,64 | 30,63 | 30,34 | 20978,69 | 22070,78 | 298,13 | 8,02 |
| | 341,00 | 32,57 | 32,39 | 32,11 | 22131,96 | 23362,97 | 291,91 | 8,32 |
| | 360,00 | 34,31 | 34,12 | 33,78 | 23303,88 | 24673,51 | 291,81 | 8,78 |
| 2550,00 | 130,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,17 |
| | 142,00 | 1,85 | 1,84 | 1,90 | 1291,29 | 1295,37 | 2192,42 | 3,46 |
| | 154,00 | 3,62 | 3,79 | 3,79 | 2587,20 | 2603,33 | 1183,10 | 3,76 |
| | 189,00 | 8,11 | 8,26 | 8,18 | 5671,05 | 5747,21 | 657,71 | 4,61 |
| | 208,00 | 12,03 | 12,10 | 12,16 | 8382,99 | 8549,15 | 486,60 | 5,07 |
| | 235,00 | 16,51 | 16,58 | 16,39 | 11429,88 | 11740,21 | 400,33 | 5,73 |
| | 247,00 | 18,37 | 18,41 | 18,24 | 12709,62 | 13094,47 | 377,26 | 6,02 |
| | 283,00 | 21,88 | 22,04 | 21,89 | 15136,30 | 15690,72 | 360,72 | 6,90 |
| | 296,00 | 26,15 | 26,50 | 26,87 | 18289,60 | 19107,02 | 309,83 | 7,22 |
| | 343,00 | 30,48 | 30,87 | 30,44 | 20928,12 | 22028,07 | 311,42 | 8,37 |
| | 353,00 | 32,28 | 32,67 | 32,12 | 22131,96 | 23367,16 | 302,13 | 8,61 |
| | 373,00 | 33,95 | 34,34 | 33,91 | 23301,60 | 24676,32 | 302,31 | 9,10 |

I.3 – Registo de velocidade dos ensaios de regime dinâmico do motor Diesel

Neste anexo estão presentes os registos de velocidade obtidos aquando da realização dos ensaios de regime dinâmico, para caracterização do MD. Os registos foram obtidos de acordo com o descrito no setor 3.3.1.

Ensaio com a velocidade de referência do MD em 1200rpm:

No ensaio de adição de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

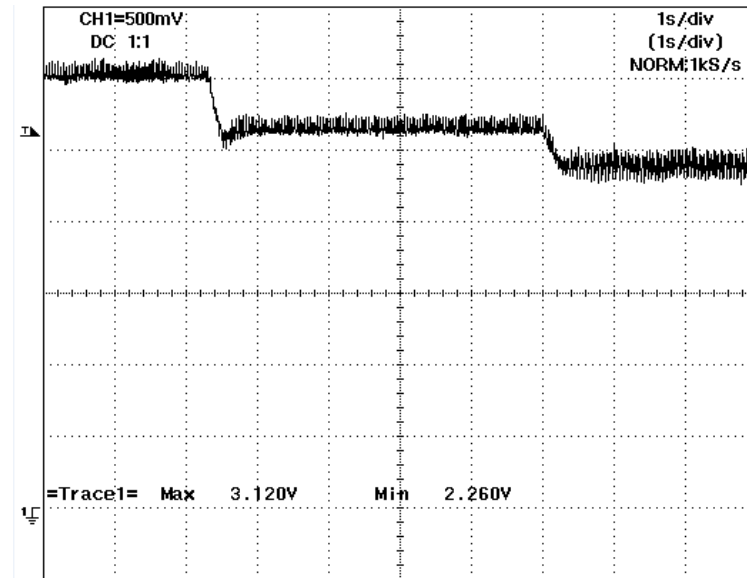


Figura I.1 – Resposta de velocidade à adição de escalões de carga a 1200rpm

No ensaio de deslastre de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

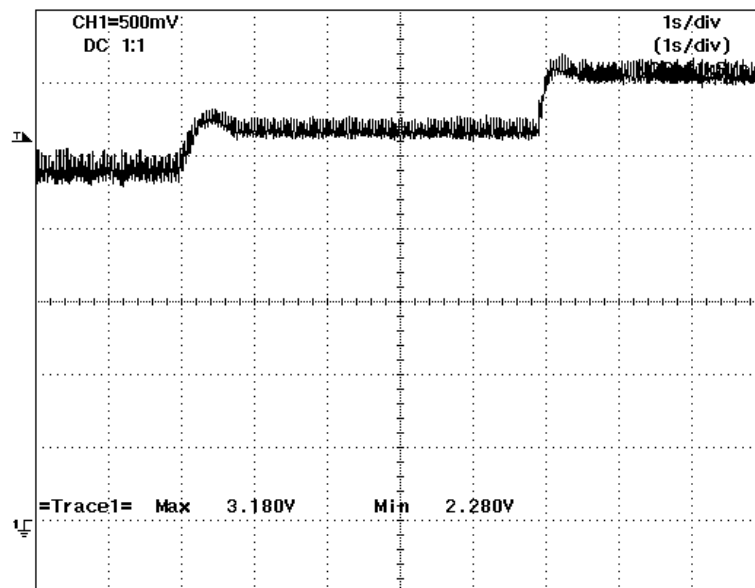


Figura I.2 – Resposta de velocidade ao deslastre de escalões de carga a 1200rpm

No ensaio de adição e deslastre de carga entre os escalões máximo e mínimo de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

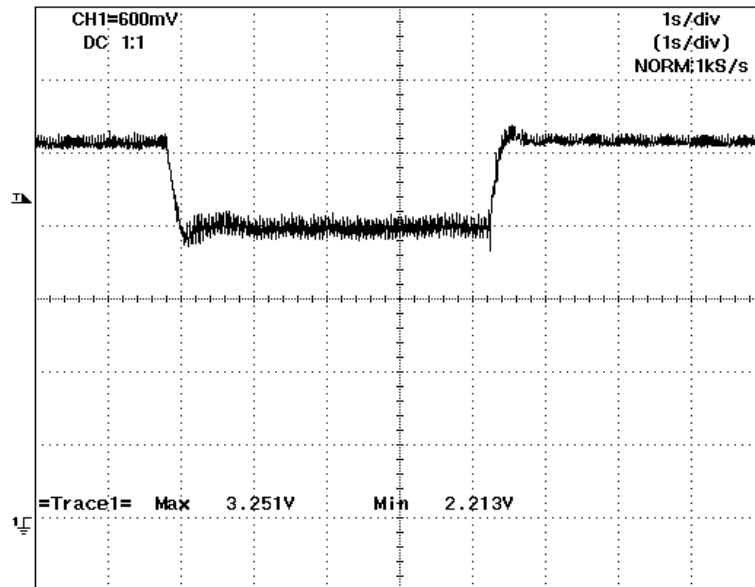


Figura I.3 – Resposta de velocidade à adição e deslastre de escalões de carga a 1200rpm

No ensaio de arranque e paragem à plena carga da velocidade final para uma regulação em vazio a 1200rpm, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

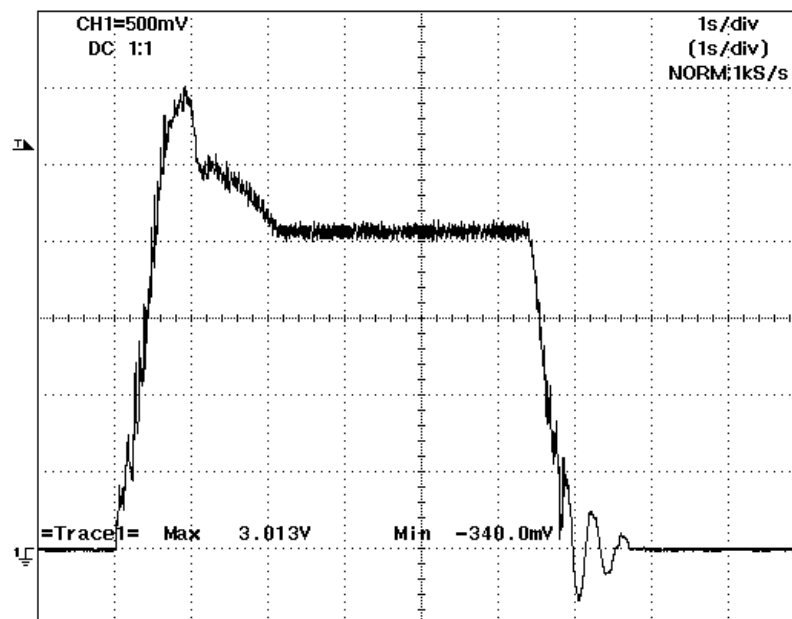


Figura I.4 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem à plena carga com regulação em vazio a 1200rpm

No ensaio de arranque e paragem para uma regulação em vazio a 1200rpm, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

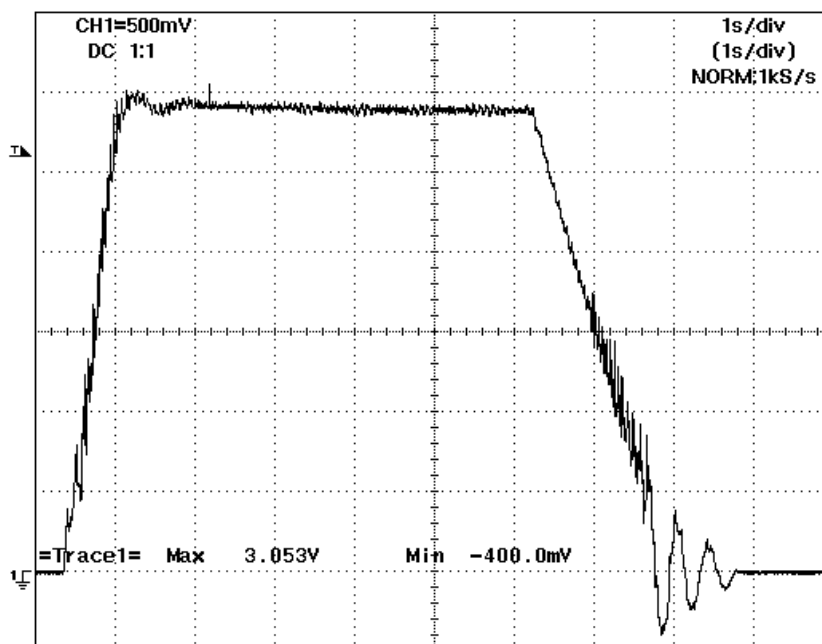


Figura I.5 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem em vazio a 1200rpm

Ensaio com a velocidade de referência do MD em 1500rpm:

No ensaio de arranque e paragem à plena carga da velocidade final para uma regulação em vazio a 1500rpm, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

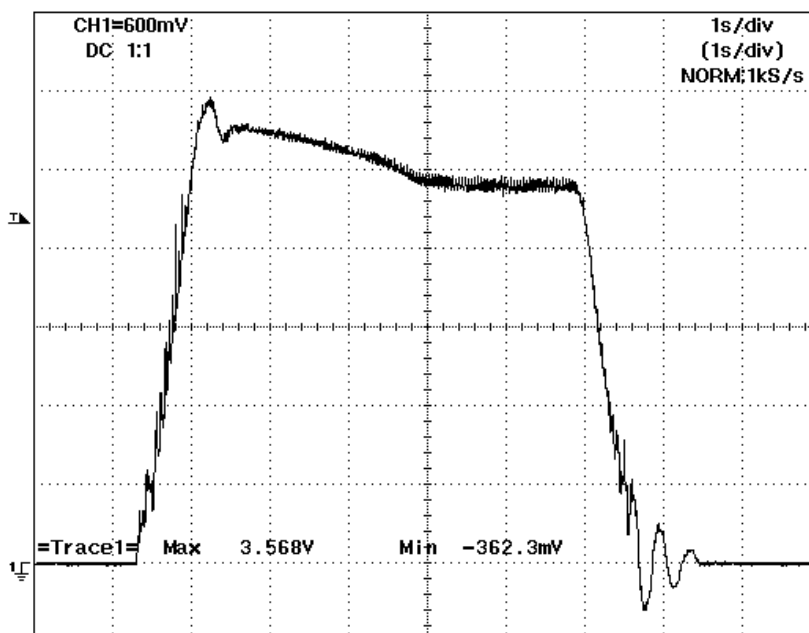


Figura I.6 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem à plena carga com regulação em vazio a 1500rpm

No ensaio de arranque e paragem para uma regulação em vazio a 1500rpm, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

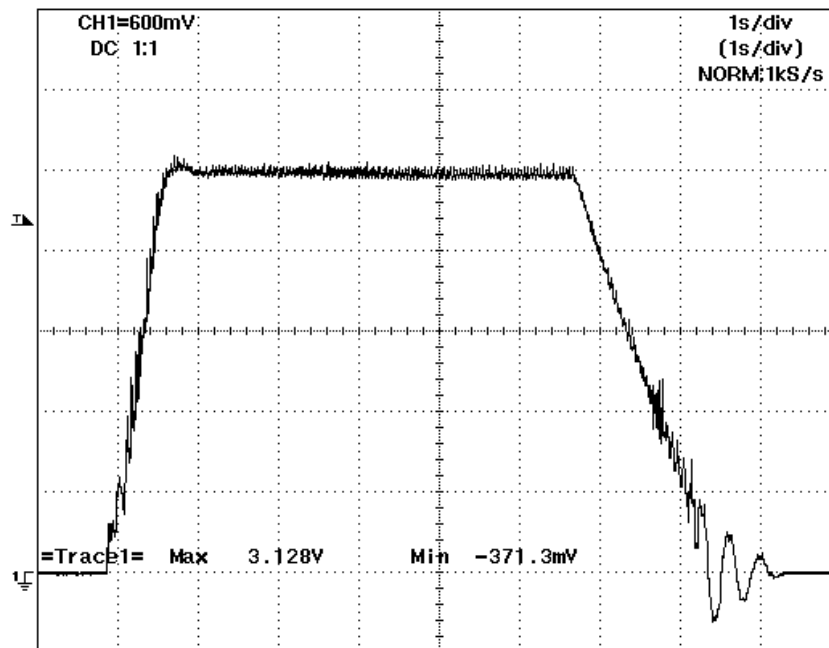


Figura I.7 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem em vazio a 1200rpm

Ensaio com a velocidade de referência do MD em 1800rpm:

No ensaio de adição de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5, nomeadamente entre o escalão mínimo e intermédio foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

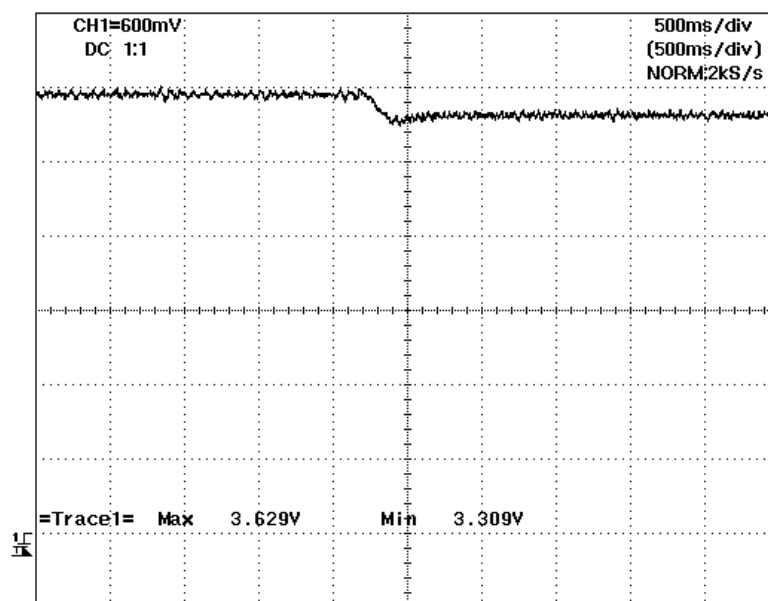


Figura I.8 – Resposta de velocidade à adição de escalões de carga a 1800rpm

No ensaio de deslastre de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5, nomeadamente entre o escalão intermédio e mínimo foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

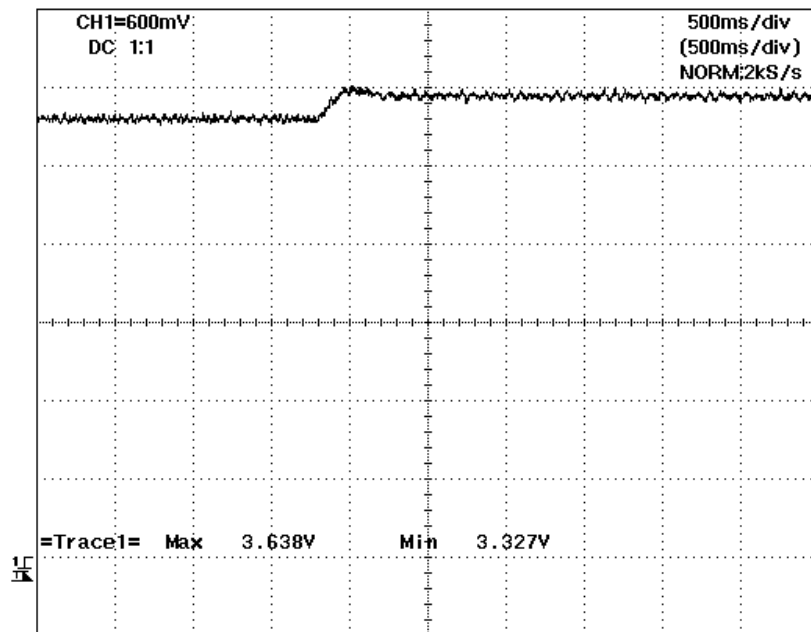


Figura I.9 – Resposta de velocidade ao deslastre de escalões de carga a 1800rpm

No ensaio de adição e deslastre de carga entre os escalões máximo e mínimo de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

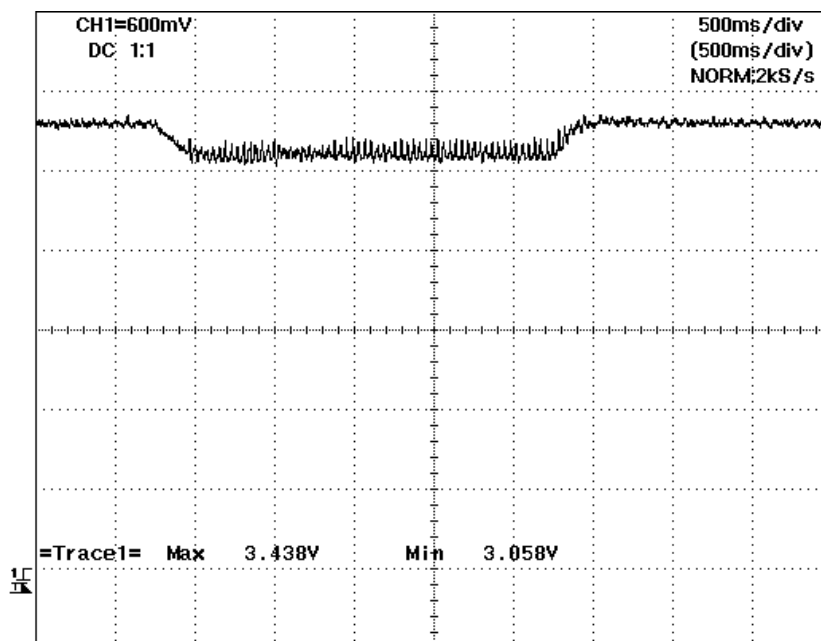


Figura I.10 – Resposta de velocidade à adição e deslastre de escalões de carga a 1800rpm

Ensaio com a velocidade de referência do MD em 2400rpm:

No ensaio de adição de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

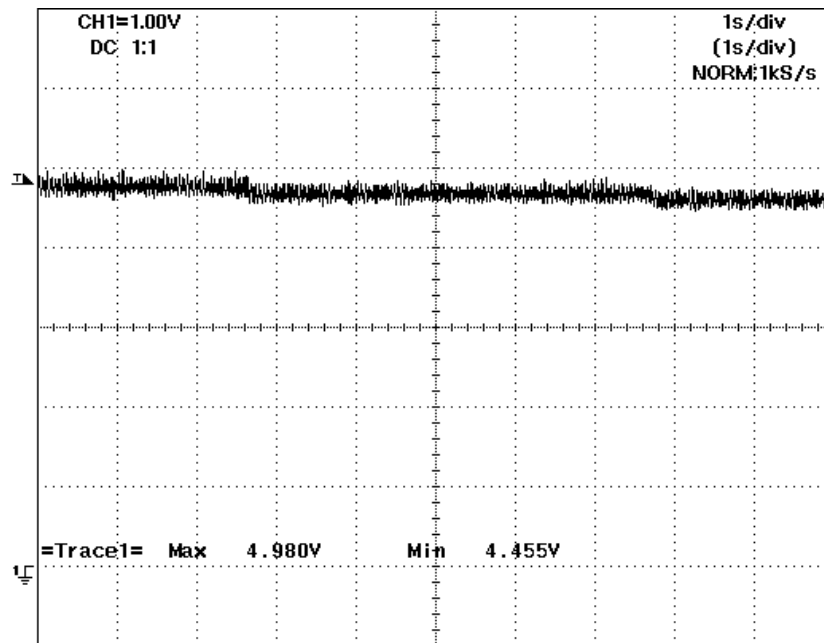


Figura I.11 – Resposta de velocidade à adição de escalões de carga a 2400rpm

No ensaio de deslastre de escalões de carga de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

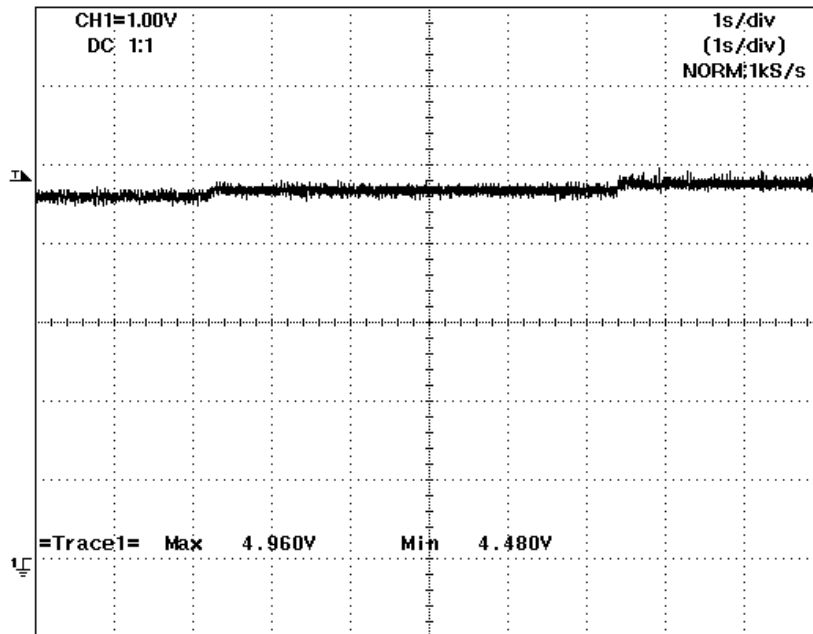


Figura I.12 – Resposta de velocidade ao deslastre de escalões de carga a 2400rpm

No ensaio de adição e deslastre de carga entre os escalões máximo e mínimo de acordo com a Tabela 3.5, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

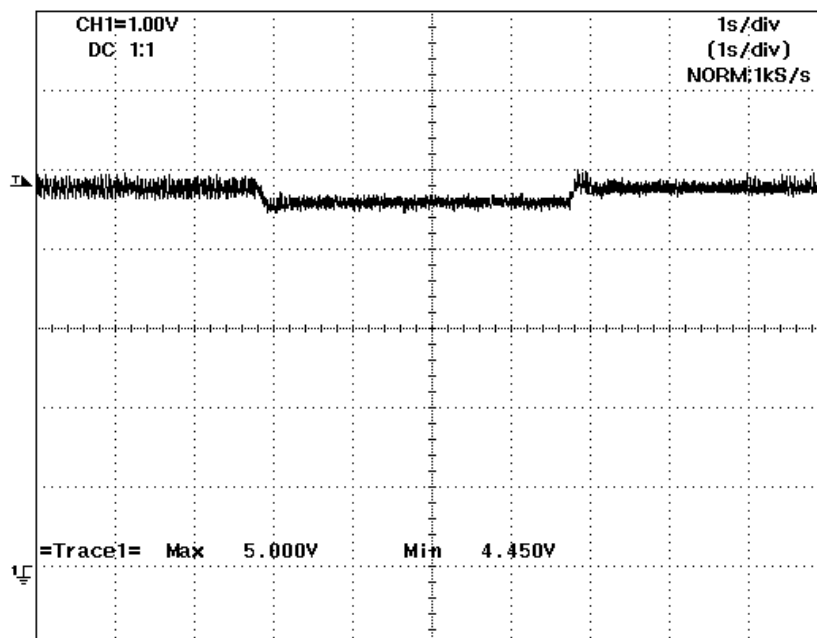


Figura I.13 – Resposta de velocidade à adição e deslastre de escalões de carga a 1800rpm

No ensaio de arranque e paragem à plena carga da velocidade final para uma regulação em vazio a 2400rpm, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

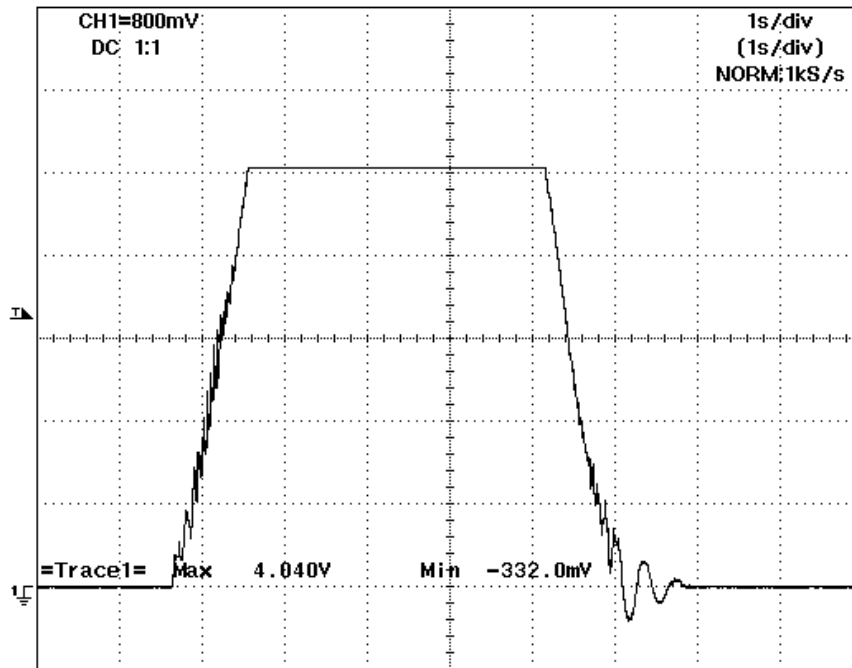


Figura I.14 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem à plena carga com regulação em vazio a 2400rpm

No ensaio de arranque e paragem para uma regulação em vazio a 2400rpm, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.23.

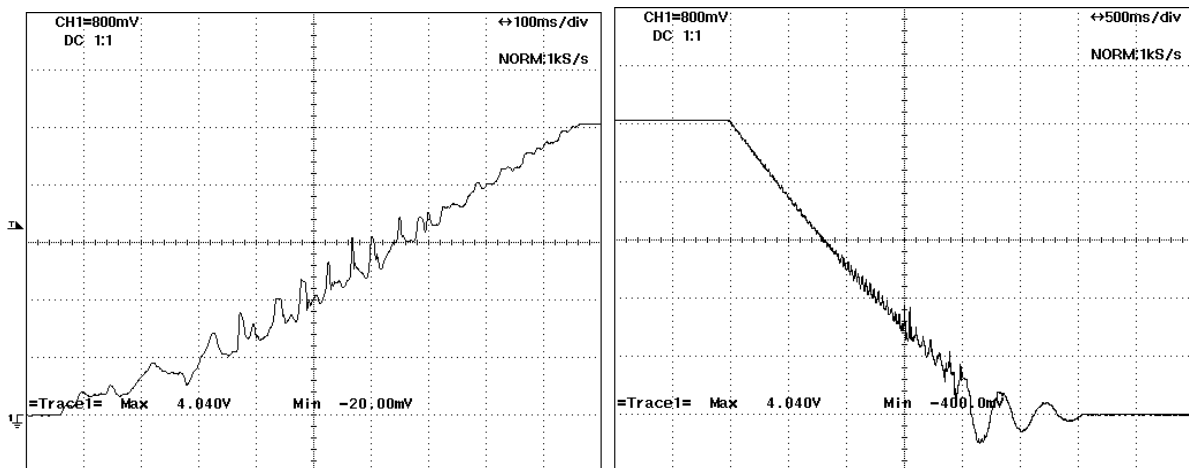


Figura I.15 – Resposta de velocidade ao arranque e paragem em vazio a 2400rpm

I.4 – Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade do motor Diesel

Apresenta-se os parâmetros da caracterização de velocidade para os diferentes ensaios realizados ao MD. De salientar que a carga representada em quilowatt/hora diz respeito à potência activa medida aos terminais do gerador síncrono.

Parâmetros dos ensaios com a velocidade de referência do MD regulada entre 1450 e 1525rpm:

Tabela I.2 - Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade do MD em ensaios de velocidade regulada entre 1450 e 1525rpm

| Frequência (Hz) | Vazio | Arranque | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|-------------------|-------|----------|--------------------------|------------------------|
| 40 | | | 0 | 1450 |
| Ensaio | | | y(tp) | y(∞) |
| Arranque/ Paragem | | | 1503,5 | 1450 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 3,69 | |
| Vazio | | Z (zeta) | 0,75 | |
| | | tp (s) | 0,9 | |
| | | tr (s) | 0,58 | |
| | | td (s) | 0,4 | |
| | | Wo (Hz) | 5,28 | |
| | | Wa (Hz) | 3,49 | |
| | | Paragem | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| | | | 1450 | 0 |
| | | | y(tp) | y(∞) |
| | | | -1850 | -1450 |
| | | Mp (%) | 27,59 | |
| | | Z (zeta) | 0,38 | |
| | | tp (s) | 1,62 | |
| | | tr (s) | 1,5 | |
| | | td (s) | 0,88 | |
| | | Wo (Hz) | 2,10 | |
| | | Wa (Hz) | 1,94 | |

| | | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|----------|--------------------------|------------------------|
| Frequência (Hz) | Plena Carga (16,15kW) | Arranque | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 40 | | | 0 | 1050 |
| Ensaio | | | y(tp) | y(∞) |
| Arranque/ Paragem | | | 1506,5 | 1050 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 43,48 | |
| 16,15 | | Z (zeta) | 0,36 | |
| | | tp (s) | 0,9 | |
| | | tr (s) | 0,45 | |
| | | td (s) | 0,3 | |
| | | Wo (Hz) | 3,74 | |
| | | Wa (Hz) | 3,49 | |
| | | Paragem | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| | | | 1050 | 0 |
| | | | y(tp) | y(∞) |
| | | | -1220 | -1050 |
| | | Mp (%) | 16,19 | |
| | | Z (zeta) | 0,5 | |
| | tp (s) | 0,65 | | |
| tr (s) | 0,45 | | | |
| td (s) | 0,35 | | | |
| Wo (Hz) | 5,58 | | | |
| Wa (Hz) | 4,83 | | | |
| Frequência (Hz) | Escalão máximo → Escalão intermédio | Interm. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 40 | | | 1200 | 1375 |
| Ensaio | | Máx. | y(tp) | y(∞) |
| Escalões Decrescentes | | | 1375 | 1325 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 3,77 | |
| 16,15 | | Z (zeta) | 0,73 | |
| | | tp (s) | 0,4 | |
| ↓ | | tr (s) | 0,19 | |
| Carga (kW) | | td (s) | 0,1 | |
| | | Wo (Hz) | 11,49 | |
| 8,5 | | Wa (Hz) | 7,85 | |

| Frequência (Hz) | Escalão mínimo → Escalão intermédio | Interm. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|-----------------------|--|----------|--------------------------|------------------------|
| 40 | | | 1375 | 1525 |
| Ensaio | | Min. | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Decrescentes | | | 1550 | 1525 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 1,64 | |
| 8,5 | | Z (zeta) | 0,81 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,21 | |
| | | tr (s) | 0,1 | |
| | | td (s) | 0,05 | |
| | | Wo (Hz) | 25,51 | |
| Carga (kW) | | Wa (Hz) | 14,96 | |
| 1,7 | Escalão intermédio → Escalão máximo | Min. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 40 | | | 1525 | 1375 |
| Ensaio | | Interm. | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Crescentes | | | 1705 | 1675 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 1,79 | |
| 1,7 | | Z (zeta) | 0,8 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,24 | |
| | | tr (s) | 0,11 | |
| | | td (s) | 0,06 | |
| | | Wo (Hz) | 21,82 | |
| Carga (kW) | | Wa (Hz) | 13,09 | |
| 8,5 | Escalão intermédio → Escalão máximo | Interm. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 40 | | | 1375 | 1160 |
| Ensaio | | Máx. | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Crescentes | | | 1200 | 1160 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 3,45 | |
| 1,7 | | Z (zeta) | 0,72 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,36 | |
| | | tr (s) | 0,19 | |
| | | td (s) | 0,1 | |
| | | Wo (Hz) | 12,57 | |
| Carga (kW) | | Wa (Hz) | 8,73 | |
| 8,5 | | | | |

| Frequência (Hz) | Escalão mínimo → Escalão máximo | Min. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|-----------------------|---------------------------------|----------|--------------------------|------------------------|
| 40 | | | 1525 | 1116 |
| Ensaio | | Máx. | y(tp) | y(∞) |
| Escalão mínimo/máximo | | | 1200 | 1116 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 7,53 | |
| 1,7 | | Z (zeta) | 0,63 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,3 | |
| | | tr (s) | 0,18 | |
| Carga (kW) | | td (s) | 0,1 | |
| 16,15 | | Wo (Hz) | 13,48 | |
| | | Wa (Hz) | 10,47 | |
| Frequência (Hz) | Escalão máximo → Escalão mínimo | Máx. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 40 | | | 1116 | 1525 |
| Ensaio | | Min. | y(tp) | y(∞) |
| Escalão máximo/mínimo | | | 1200 | 1116 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 7,53 | |
| 16,15 | | Z (zeta) | 0,63 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,3 | |
| | | tr (s) | 0,18 | |
| Carga (kW) | | td (s) | 0,1 | |
| 1,7 | | Wo (Hz) | 13,48 | |
| | | Wa (Hz) | 10,47 | |

Parâmetros dos ensaios com a velocidade de referência do MD regulada entre 1500 e 1800rpm:

Tabela I.3 – Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade do MD em ensaios de velocidade regulada entre 1500 e 1800rpm

| Frequência (Hz) | Vazio | Arranque | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|--------------------|-------|----------|--------------------------|------------------------|
| 50 | | | 0 | 1500 |
| Ensaio | | | y(tp) | y(∞) |
| Arranque / Paragem | | | 1564 | 1500 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 4,27 | |
| Vazio | | Z | 0,7 | |
| | | tp (s) | 0,82 | |
| | | tr (s) | 0,6 | |
| | | td (s) | 0,46 | |
| | | Wo (Hz) | 5,36 | |
| | | Wa (Hz) | 3,83 | |
| | | Paragem | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| | | | 1500 | 0 |
| | | | y(tp) | y(∞) |
| | | | -1681,2 | -1500 |
| | | Mp (%) | 12,08 | |
| | | Z | 0,55 | |
| | | tp (s) | 0,9 | |
| | | tr (s) | 0,56 | |
| | | td (s) | 0,36 | |
| | | Wo (Hz) | 4,18 | |
| | | Wa (Hz) | 3,49 | |

| | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|----------|--------------------------|--|------------------------|--|
| Frequência (Hz) | Plena Carga (19,6kW) | Arranque | Velocidade inicial (rpm) | | Velocidade final (rpm) | |
| 50 | | | 0 | | 1440 | |
| Ensaio | | | y(tp) | | y(∞) | |
| Arranque/ Paragem | | | 1784 | | 1440 | |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 23,89 | | | |
| 19,6 | | Z (zeta) | 0,45 | | | |
| | | tp (s) | 0,95 | | | |
| | | tr (s) | 0,48 | | | |
| | | td (s) | 0,4 | | | |
| | | Wo (Hz) | 3,70 | | | |
| | | Wa (Hz) | 3,31 | | | |
| | | Paragem | Velocidade inicial (rpm) | | Velocidade final (rpm) | |
| | | | 1440 | | 0 | |
| | | | y(tp) | | y(∞) | |
| | | | -1621 | | -1440 | |
| | | Mp (%) | 12,57 | | | |
| | | Z (zeta) | 0,55 | | | |
| | | tp (s) | 0,85 | | | |
| | | tr (s) | 0,75 | | | |
| | | td (s) | 0,35 | | | |
| | Wo (Hz) | 4,43 | | | | |
| Wa (Hz) | 3,70 | | | | | |
| Frequência (Hz) | Escalão intermédio → Escalão mínimo | Interm. | Velocidade inicial (rpm) | | Velocidade final (rpm) | |
| 50 | | | 1680 | | 1770 | |
| Ensaio | | Min. | y(tp) | | y(∞) | |
| Escalões Decrescentes | | | 1800 | | 1770 | |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 1,69 | | | |
| 12 | | Z (zeta) | 0,81 | | | |
| ↓ | | tp (s) | 0,45 | | | |
| | | tr (s) | - | | | |
| | | td (s) | - | | | |
| Carga (kW) | | Wo (Hz) | 11,90 | | | |
| 2,65 | | Wa (Hz) | 6,98 | | | |

| Frequência (Hz) | Escalão máximo → Escalão intermédio | Máx. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|-----------------------|-------------------------------------|----------|--|------------------------|
| 50 | | Min. | 1570 | 1680 |
| Ensaio | | | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Decrescentes | | | 1710 | 1680 |
| | | Mp (%) | 1,79 | |
| Carga (kW) | | Z (zeta) | 0,79 | |
| 19,6 | | tp (s) | 0,225 | |
| ↓ | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| Carga (kW) | | Wo (Hz) | 22,77 | |
| 12 | | Wa (Hz) | 13,96 | |
| Frequência (Hz) | Escalão mínimo → Escalão intermédio | Min. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 50 | | Interm. | 1770 | 1680 |
| Ensaio | | | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Crescentes | | | Idêntico a redução de escalão de carga | |
| | | Mp (%) | 1,69 | |
| Carga (kW) | | Z (zeta) | 0,81 | |
| 2,65 | | tp (s) | 0,45 | |
| ↓ | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| Carga (kW) | | Wo (Hz) | 11,90 | |
| 12 | | Wa (Hz) | 6,98 | |
| Frequência (Hz) | Escalão intermédio → Escalão máximo | Interm. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 50 | | Máx. | 1680 | 1570 |
| Ensaio | | | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Crescentes | | | Idêntico a redução de escalão de carga | |
| | | Mp (%) | 1,79 | |
| Carga (kW) | | Z (zeta) | 0,79 | |
| 12 | | tp (s) | 0,225 | |
| ↓ | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| Carga (kW) | | Wo (Hz) | 22,77 | |
| 19,6 | | Wa (Hz) | 13,96 | |

| Frequência (Hz) | Escalão máximo → Escalão mínimo | Máx. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|------------------------|---------------------------------|----------|--|------------------------|
| 50 | | | 1570 | 1800 |
| Ensaio | | Min. | $\gamma(tp)$ | $\gamma(\infty)$ |
| Escalão máximo/ mínimo | | | 1858 | 1800 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 3,22 | |
| 19,6 | | Z (zeta) | 0,71 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,25 | |
| | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| Carga (kW) | | Wo (Hz) | 17,84 | |
| 2,65 | | Wa (Hz) | 12,57 | |
| Frequência (Hz) | Escalão mínimo → Escalão máximo | Min. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 50 | | | 1800 | 1570 |
| Ensaio | | Máx | $\gamma(tp)$ | $\gamma(\infty)$ |
| Escalão mínimo/ máximo | | | Idêntico a redução de escalão de carga | |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 3,22 | |
| 2,65 | | Z (zeta) | 0,71 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,25 | |
| | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| Carga (kW) | | Wo (Hz) | 17,84 | |
| 19,6 | | Wa (Hz) | 12,57 | |

Parâmetros dos ensaios com a velocidade de referência do MD regulada entre 2000 e 2390rpm:

Tabela I.4 – Parâmetros de caracterização da resposta de velocidade do MD em ensaios de velocidade regulada entre 2000 e 2390rpm

| Frequência (Hz) | Vazio | Arranque | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|-------------------|-------|----------|--------------------------|------------------------|
| 80 | | | 0 | 2000 |
| Ensaio | | | y(tp) | y(∞) |
| Arranque/ Paragem | | | 2020 | 2000 |
| | | Mp (%) | 1,00 | |
| | | Z (zeta) | 0,98 | |
| | | tp (s) | 0,905 | |
| | | tr (s) | 0,335 | |
| | | td (s) | 0,525 | |
| | | Wo (Hz) | 17,44 | |
| | | Wa (Hz) | 3,47 | |
| | | Paragem | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| | | | 2000 | 0 |
| | | | y(tp) | y(∞) |
| | | | -2200 | -2000 |
| | | Mp (%) | 10,00 | |
| | | Z (zeta) | 0,59 | |
| | | tp (s) | 2,15 | |
| | | tr (s) | 1,725 | |
| | | td (s) | 1,1 | |
| | | Wo (Hz) | 1,81 | |
| | | Wa (Hz) | 1,46 | |

| | | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|----------|--------------------------|------------------------|
| Frequência (Hz) | Plena Carga (19,6kW) | Arranque | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 80 | | | 0 | 2000 |
| Ensaio | | | y(tp) | y(∞) |
| Arranque/ Paragem | | | 2020 | 2000 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 1,00 | |
| 19,6 | | Z (zeta) | 0,98 | |
| | | tp (s) | 0,94 | |
| | | tr (s) | 0,63 | |
| | | td (s) | 0,52 | |
| | | Wo (Hz) | 16,79 | |
| | | Wa (Hz) | 3,34 | |
| | | Paragem | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| | | | 2000 | 0 |
| | | | y(tp) | y(∞) |
| | | | -2116,5 | -2000 |
| | | Mp (%) | 5,83 | |
| | | Z (zeta) | 0,61 | |
| | | tp (s) | 1,5 | |
| | | tr (s) | 0,71 | |
| | | td (s) | 0,34 | |
| | Wo (Hz) | 2,64 | | |
| Wa (Hz) | 2,09 | | | |
| Frequência (Hz) | Escalão máximo → Escalão intermédio | Máx. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 80 | | | 2225 | 2340 |
| Ensaio | | Inter. | y(tp) | y(∞) |
| Escalões Decrescentes | | | 2370 | 2340 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 1,28 | |
| 19,6 | | Z (zeta) | 0,9 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,19 | |
| | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| Carga (kW) | | Wo (Hz) | 37,93 | |
| 11,9 | | Wa (Hz) | 16,53 | |

| Frequência (Hz) | Escalão mínimo Escalão intermédio → Escalão mínimo | Inter. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|-----------------------|---|----------|--------------------------|------------------------|
| 80 | | | 2340 | 2370 |
| Ensaio | | Min. | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Decrescentes | | | 2420 | 2370 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 2,11 | |
| 11,9 | | Z (zeta) | 0,79 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,15 | |
| | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| 2,65 | | Wo (Hz) | 34,16 | |
| | | Wa (Hz) | 20,94 | |
| Frequência (Hz) | Escalão mínimo Escalão intermédio → Escalão intermédio | Min. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 80 | | | 2370 | 2340 |
| Ensaio | | Inter. | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Crescentes | | | 2420 | 2370 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 2,11 | |
| 2,65 | | Z (zeta) | 0,79 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,15 | |
| | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| Carga (kW) | | Wo (Hz) | 34,16 | |
| 11,9 | | Wa (Hz) | 20,94 | |
| Frequência (Hz) | Escalão intermédio Escalão intermédio → Escalão máximo | Inter. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 80 | | | 2340 | 2370 |
| Ensaio | | Máx. | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalões Crescentes | | | 2370 | 2340 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 1,28 | |
| 11,9 | | Z (zeta) | 0,9 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,19 | |
| | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| 19,6 | | Wo (Hz) | 37,93 | |
| | | Wa (Hz) | 16,53 | |

| Frequência (Hz) | Escalão mínimo → Escalão máximo | Min. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
|------------------------|---------------------------------|----------|--------------------------|------------------------|
| 80 | | | 2390 | 2225 |
| Ensaio | | Máx. | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalão máximo/ mínimo | | | 2300 | 2225 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 3,37 | |
| 2,65 | | Z (zeta) | 0,72 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,15 | |
| | | tr (s) | - | |
| Carga (kW) | | td (s) | - | |
| 19,6 | | Wo (Hz) | 30,18 | |
| | | Wa (Hz) | 20,94 | |
| Frequência (Hz) | Escalão máximo → Escalão mínimo | Máx. | Velocidade inicial (rpm) | Velocidade final (rpm) |
| 80 | | | 2225 | 2390 |
| Ensaio | | Min. | $y(tp)$ | $y(\infty)$ |
| Escalão máximo/mínimo | | | 2460 | 2390 |
| Carga (kW) | | Mp (%) | 2,93 | |
| 19,6 | | Z (zeta) | 0,73 | |
| ↓ | | tp (s) | 0,15 | |
| | | tr (s) | - | |
| | | td (s) | - | |
| | | Wo (Hz) | 30,64 | |
| 2,65 | | Wa (Hz) | 20,94 | |

I.5 – Parametrização dos conversores de potência

A parametrização dos conversores de potência ACS 600 foi efetuada com base no manual de utilização. A Tabela I.5, apresenta os parâmetros de ambos os conversores de potência.

Tabela I.5 – Parametrização dos conversores de potência segundo o seu manual de utilização (Adaptado de [50])

| Parâmetro | Definições possíveis | Macro de Velocidade | Macro de Binário |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------|
| 11 REFERENCE SELECT | | | |
| 11.01 TORQUE REF SEL | ZERO; AI1; AI2; FB R2; FB R5 | ZERO | FB R2 |
| 11.02 ADD TORQUE REF | ZERO; AI1; AI2; FB R2; FB R5 | ZERO | ZERO |
| 11.03 TORQUE LIMIT1 SEL | MAX TORQUE 1; AI1; AI2; FB R2; FB R3 | MAX TORQUE1 | MAX TORQUE1 |
| 11.04 SPEED REF1 SEL | ZERO; AI1; AI2; FB R1; DIG FUNC | FB R1 | Zero |

| | | | |
|---------------------------|--|----------------------------|-------------------------|
| | GEN; SQUARE WAVE; CONST REF1; ENC GEAR | | |
| 11.09 OPERATIN MODE 1 | SPEED; TORQUE; POSITION; | SPEED | TORQUE |
| 15 ANALOGUE OUTPUT | | | |
| 15.01 ANALOGUE OUTPUT 1 | 0) ZERO; (1) ESTIM SPEED; (2) FREQUENCY; (3) CURRENT; (4) TORQUE; (5) POWER; (6) DC BUS VOLT; (7) OUTPUT VOLT; (8) DIG FUNC GEN; (9) TORQUE REF LIM; (10) Reserved; (11) SPEED REF; (12) SPEED ACT 1; (13) SPEED ERR1; (14) Reserved; (15) ENC 2 SPEED; (16) ACT POS SPEED; (17) SPEED FEED FORW; (18) POS ERROR; (19) SYNC ERROR; (20) TARGET DIST; (21) INTP POS REF; (22) POS INTERP OUTPUT; (23) POS INTERP INPUT; (24) ENC2 POS; (25) POSITION ACT VAL; (26) ENC1 SFT POS; (27) ENC2 SFT POS; (28) SYNC POS REF; (29) POS CTRL REF; (30) GEAR INPUT; (31) GEAR OUTPUT; (32) FB_R1; (33) FB_R2; (34) FB_R12; (35) FB_R3; (36) FB_R4; (37) FB_R5; (38) FB_R45; (39) SPEED CTRL PART; (40) SPEED CTRL I PART; (41) SPEED FEED FORW; (42) CONST REF 1; (43) SQUARE WAVE GEN; (44 ... 63) Reserved | 12 | 4 |
| Parâmetro | Definições possíveis | Macro de Velocidade | Macro de Binário |
| 20 LIMITS | | | |
| 20.01 MIN SPEED REF | [-15000;0] rpm | -3000 rpm | -3000 rpm |
| 20.01 MAX SPEED REF | [0;15000] rpm | 3000 rpm | 3000 rpm |
| 20.04 MAX TORQUE 1 | 0% ... 100% | 100% | 100% |
| 20.06 TORQUE LIM SWITCH | NOT SEL; DI1 ... DI12; NTACP-DI1 ... NTACPD14; FB CW B12 ... FB CW B15 | NOT SEL | NOT SEL |
| 20.07 OVERVOLTAGE CTRL | ON; OFF | OFF | OFF |
| 20.08 UNDERVOLTAGE CTRL | ON; OFF | ON | ON |
| 23 SPEED CTRL | | | |
| 23.01 PI PAR SET1/2 SEL | NOT SEL; DI1 ... DI12; NTACP-DI1 ... NTACPD14; FBCWB12 ... FBCWB15 | NOT SEL | NOT SEL |
| 23.02 GAIN 1 | 0...500 | 10 | 10 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------|--------------|
| 23.03 INTEGRATION TIME1 | 0.00 ... 100 000 ms | 162.7 ms | 250.0 ms |
| 23.11 ACT SPEED SEL | ENC1 SPEED; ESTIMATED; AI2 | ENC1 SPEED | ENC1 SPEED |
| 24 TORQUE CTRL | | | |
| 24.03 TORQ LOAD SHARE | -100% ... 100% | 100% | 100% |
| 50 ENCODER INTERFACE | | | |
| 51.01 MODULE TYPE | | nmba-01 V1.4 | nmba-01 V1.4 |
| 51.02 MODBUS MODE | RTU wdg:flt; RTU wdg:rst | RTU wdg:flt | RTU wdg:flt |